THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à l'Ecole des hautes études en sciences sociales

Les systèmes complexes et la digitalisation des sciences. Histoire et sociologie des instituts de la complexité aux États-Unis et en France

Ecole doctorale n°286

ECOLE DOCTORALE DE L'EHESS

Spécialité Sociologie

COMPOSITION DU JURY :

M. DEMORTAIN David
Chargé de recherche HDR INRA
Rapporteur

Mme. LAUGIER Sandra
Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Rapporteuse

Mme. DAHAN Amy
Directrice de recherche CNRS
Membre du jury

M. FEUERHAHN Wolf
Chargé de recherche CNRS
Membre du jury

M. VARENNE Franck
Maître de conférences HDR Université de Rouen,
Membre du jury

Mme. PUMAIN Denise
Professeur Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Invitée

Soutenue par **Fabrizio LI VIGNI**
le 26 novembre 2018

Dirigée par **Francis Chateauraynaud**

L'ECOLE DES HAUTES ETUDES EN SCIENCES SOCIALES | PSL

Résumé en français :

Comment penser la relation entre les cultures scientifiques contemporaines et l'usage grandissant de l'ordinateur dans la production des savoirs ? Cette thèse se propose de donner une réponse à telle question à partir de l'analyse historique et sociologique d'un domaine scientifique fondé par le Santa Fe Institute (SFI) dans les années 1980 aux États-Unis : les « sciences des systèmes complexes » (SSC). Rendues célèbres par des publications grand-public, les SSC se répandent au cours des années 1990 et 2000 en Europe et dans d'autres pays du monde. Ce travail propose une histoire de la fondation de ce domaine en se concentrant sur le SFI et sur le Réseau National des Systèmes Complexes français. Avec un regard sociologique ancré dans les *Science & Technology Studies* et dans le courant pragmatiste, elle pose ensuite des questions sur le statut socio-épistémique de ce domaine, sur les modalités de l'administration de la preuve dans des savoirs fondés sur la simulation numérique et enfin sur les engagements épistémiques tenus par les spécialistes des systèmes complexes. Le matériau empirique – composé d'environ 200 entretiens, plusieurs milliers de pages d'archives et quelques visites de laboratoire – nous amène non seulement à mieux connaître ce champ de recherche – dont le langage est très répandu aujourd'hui, mais peu étudié par les historiens et les sociologues ; il nous porte aussi à questionner trois opinions courantes dans la littérature humaniste à propos des sciences numériques. À savoir : 1) l'ordinateur produit des connaissances de plus en plus interdisciplinaires, 2) il donne vie à des savoirs de type nouveau qui nécessitent une toute autre épistémologie pour être pensés et 3) il fait inévitablement advenir des visions du monde néolibérales. Or, cette thèse déconstruit ces trois formes de déterminisme technologique concernant les effets de l'ordinateur sur les pratiques scientifiques, en montrant d'abord que, dans les sciences computationnelles, les rapports interdisciplinaires ne se font pas sans effort ni pacifiquement ou sur pied d'égalité ; ensuite que les chercheurs et les chercheuses des SSC mobilisent des formes d'administration de la preuve déjà mises au point dans d'autres disciplines ; et enfin que les engagements épistémiques des scientifiques peuvent prendre une forme proche de la vision (néo)libérale, mais aussi des formes qui s'en éloignent ou qui s'y opposent.

Mots-clés : sciences des systèmes complexes, sciences computationnelles, histoire des sciences, sociologie des sciences, STS, pragmatisme, simulation numérique, interdisciplinarité

Abstract in English :

How to think the relationship between contemporary scientific cultures and the rising usage of computer in the production of knowledge ? This thesis offers to give an answer to such a question, by analyzing historically and sociologically a scientific domain founded by the Santa Fe Institute (SFI) in the 1980s in the United States : the « complex systems sciences » (CSS). Become well-known thanks to popular books and articles, CSS have spread in Europe and in other countries of the world in the course of the 1990s and the 2000s. This work proposes a history of the foundation of this domain, by focussing on the SFI and on the French Complex Systems National Network. With a sociological take rooted into Science & Technology Studies and into pragmatism, it then asks some questions about the socio-epistemic status of such a domain, about the modalities of production of evidence as they are employed in the context of digital simulation and, finally, about the epistemic engagements hold by complexity specialists. Empirical material – composed by circa 200 interviews, several thousands archival pages and a small number of laboratory visits – allows us not only to improve knowledge about this field – whose language is very common today, but little studied by historians and sociologists ; it also brings us to question three current opinions in the human and social sciences literature regarding digital sciences. That is : 1) that the computer produces more and more interdisciplinary knowledge, 2) that it gives birth to a new type of knowledge which needs an entirely new epistemology to be well understood and 3) that it inevitably brings about neoliberal visions of the world. Now, this thesis deconstructs these three forms of technological determinism concerning the effects of computer on scientific practices, by showing firstly that, in digital sciences, the interdisciplinary collaborations are not made without any effort and in a symetrical and pacific way ; secondly, that CSS' researchers mobilize a kind of evidence production techniques which are well known in other disciplines ; and, thirdly, that scientists' epistemic engagements can take (neo)liberal forms, but also other forms that depart from neoliberalism or that stand against it.

Key-words : complex systems sciences, computational sciences, history of sciences, sociology of sciences, STS, pragmatism, numerical simulation, interdisciplinarity

Remerciements

Au début de mes années d'étude en France, j'ai souvent entendu dire que « la recherche est collective », même si l'auteur d'un travail scientifique n'est qu'un. C'est seulement à la fin de ces quatre années de thèse que je comprends pleinement cette phrase.

Je tiens à remercier tout d'abord les membres de mon jury de thèse, pour avoir accepté de lire et de commenter ce travail : Francis Chateauraynaud, Amy Dahan, David Demortain, Wolf Feuerhahn, Sandra Laugier, Franck Varenne et Denise Pumain. Merci du temps que vous m'avez dédié.

Une pensée particulièrement reconnaissante va à Francis, pour son travail de direction. Il a toujours été disponible et ironique, ouvert et tolérant, à la fois critique et indulgent. Merci, c'était l'idéal.

Merci infiniment à Benjamin Raimbault et à Sara Aguiton, pour leur amitié, pour leurs conseils et pour leurs critiques fondamentaux : ce travail leur doit beaucoup. À Marianne Noël pour son support et son encouragement constants, indispensables. À Fulvio Licata, Antonino Sorci et Antoine Delaunay, pour avoir déliré avec moi pendant ces années, sur ma thèse et sur beaucoup plus. Et bien sûr un merci énorme à mon frère Karel pour m'avoir supporté et toléré pendant tout ce temps, et pour m'avoir donné beaucoup plus que ce qu'il ne pense.

Je remercie de tout mon cœur tous mes interviewés pour la générosité dont ils ont fait preuve. Ils sont beaucoup trop nombreux pour être tous cités ici : je renvoie à la bibliographie et en particulier à la section « Entretiens » pour lire leurs noms. Je n'oublierai jamais nos discussions passionnantes.

Je remercie ensuite les amis du GSPR – Nassima Abdelghafour, Josquin Debaz, Martin Denoun, Jean Francès, Flore Guiffault, Markku Lehtonen, Aymeric Luneau, Adhémar Saunier et Stéphanie Taveneau – pour toutes les discussions, les rires, les échanges et les coups de main qu'on s'est donnés ces dernières années. Ils ont été très formateurs.

Je remercie également le laboratoire Alexandre Koyré, pour toutes les occasions d'apprentissage, de remise en question et d'échange qu'il a pu m'offrir pendant le master, après et encore aujourd'hui : merci particulièrement à Christophe Bonneuil, Hélène Guillemot, Wolf Feuerhahn, Amy Dahan, Dominique Pestre, Adeline Néron,

Benoît Dauguet, Aline Waltzing, Emmanuel Bertrand et à bien d'autres chercheurs et étudiants qui ont gravité ou gravitent autour de cet important lieu de savoirs.

Merci à Pierre-Benoît Joly, à Rigas Arvanitis, à Marc Barbier, à Hélène Guillemot, à Soraya Boudia, à Jean-Paul Gaudillière, à David Demortain, à Ashveen Perbaye et à David Flacher pour le riche environnement intellectuel qu'ils ont réussi à créer avec l'IFRIS et notamment avec son École Thématique, rencontre annuelle immanquable pour mettre à l'épreuve mes idées et pour rencontrer des amis.

Merci aussi au Media Cultures of Computer Simulation de la Leuphana University à Lüneburg qui m'a hébergé de janvier à juin 2018 et qui m'a permis de terminer ma thèse dans de parfaites conditions. Merci à Sebastian Vehlken, Ricky Wichum, Martin Warnke, Thomas Turnbull, Helge Peters, Johannes Bruder et à Jantje Sieling.

Je remercie enfin par ordre alphabétique tout une série de personnes qui m'ont donné à des moments de l'aide intellectuelle ou pratique, amicale ou affective, de manière épisodique ou de manière quotidienne. J'espère n'oublier personne, mais ceux et celles qui ont été importants pour mon avancement scientifique et pour ma survie psycho-physique savent déjà combien je leur dois : Simone Anzà, David Aubin, Marine Al Dahdah, Stefan Aykut, Marc Barbier, Mathieu Baudrin, Jerome Baudry, Roberto Cantoni, Christian Carletti, Nicolas Baya-Laffitte, Tiziana Beltrame, Antonino Bondì, Henry Boullier, Sébastien Broca, Sylvain Brunier, Sébastien Dutreuil, Paul Edwards, Aurélien Féron, Jean Foyer, Sara Franceschelli, Jean-Baptiste Fressoz, Ludovic Fulleringer, Johan Giry, Nadia Gofiantini, Garance Goux, Céline Granjou, Hélène Guillemot, Islam Hajjar, Stefan Helmreich, Maïté Juan, Nils Kessel, Baptiste Kotras, Francesco La Mantia, James Lambert, Claire Le Renard, Catherine Loridant, mon père Mauro Li Vigni, Waldir Lisboa Rocha, Clément Marquet, Germain Meulemans, Baptiste Monsangeon, Mathieu Quet, Anne-Fleur de Sagazan, Scarlett Salman, Sébastien Shulz, ma mère Elvira Siragusa, Jessica Thomas, Sara Tosi, Franck Varenne, Jennifer Wells, Gian Marco Zappardo et Giorgio Zappardo. Je consacre une pensée aussi à toutes les rencontres éphèmères à la marge de conférences ou d'écoles d'été, qui m'ont aidé également.

Cette thèse est dédiée à mes meilleurs Amis, appellation qui me paraît supérieure à tout autre – ma & pa, Kai, Mabout, Tama, Ben, Fu, Nino, Didi & Nadinha, Ciccio, Gimmy, Giorgino, merci. Toute ma vie, dont cette thèse n'est qu'une partie, tourne autour de vous.

Liste des abréviations

ACI : Action Concertée Incitative
ACtioN : Applied Complexity Network
BusNet : Business Network
CAS : Complex Adaptive Systems
CDC : Center for Disease Control
CENOLI : Centre Interdisciplinaire de Phénomènes Non-linéaires et de Systèmes Complexes
ComMod : Companion Modeling
CREA : Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée
CS-DC : Complex Systems – Digital Campus
DARPA : Defense Advanced Research Projects Agency
DIM : Domaine d'Interêt Majeur
ECCS : European Conference on Complex Systems
ECDC : European Center for Disease Control
EpiSimS : Epidemic Simulation System
FET : Future and Emerging Technologies
FP5, FP6, FP7… : Framework Programs 5, 6, 7…
GIS : Groupement d'Intérêt Scientifique
GLEaMviz : GLobal Epidemic and Mobility visualization
GSS : Global System Science
Horizon 2020 : huitième programme cadre de la Commission Européenne (après FP7)
InSHS : Institut des Sciences Humaines et Sociales du CNRS
ISC : Institut des Sciences de la Complexité
ISC-PIF : Institut des Systèmes Complexes
ISI : Institute for Scientific Interchange
ISS : Institut de Surveillance Sanitaire (Italie)
IXXI : Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpin
LANL : Los Alamos National Laboratory
LISC : Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Complexes
MBA : modèle à base d'agent
MESR : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
NEST : New and Emerging Science and Techonologies
NIH : National Institute of Health
NSF : National Science Foundation
RNSC : Réseau National des Systèmes Complexes
SFI : Santa Fe Institute
SimPOP : Simulation Population
SSC : sciences des systèmes complexes ou de la complexité
STS : Science and Technology Studies
UMR : Unité Mixte de Recherche
UMS : Unité Mixte de Service
UPS : Unité Propre de Service

Table des matières

Résumé en français : ... 2
Abstract in English : ... 2
Remerciements ... 3
Liste des abréviations ... 5
Introduction générale ... 14
Les trois formes de déterminisme techn(olog)ique ... 15
Les sciences et l'idiome de la complexité ... 19
Les sciences computationnelles à la lumière des sciences de la complexité ... 23
Dispositif d'enquête ... 25
Approche théorique et onto-épistémologie ... 26
Plan de la thèse ... 34
Notes terminologiques ... 38
Prologue – Chapitre 1 – Les théories de la complexité : un essai de mise en ordre ... 41
Introduction ... 41
Critères pour définir le périmètre de l'enquête ... 42
Matériaux et structure du chapitre ... 44
Les tentatives de classification ... 45
Le concept de tradition ... 50
Les traditions des théories de la complexité ... 53
L'archipel des traditions cybersystémiques (pensée complexe, complexité par le bruit, etc.) ... 54
L'archipel des traditions des systèmes dynamiques (sciences des systèmes complexes, synergétiques, etc.) ... 58
La tradition de la complexité computationnelle (la théorie de la complexité) ... 62
La tradition de la complexité de Kolmogorov (ou de Kolmogorov-Solomon-Chaitin) (la théorie de la complexité de l'information) ... 64
La tradition des systèmes complexes adaptatifs (la théorie de la complexité en médecine) ... 66
La tradition de l'ingénierie des systèmes (la conception et le management des systèmes complexes artificiels) ... 68
La tradition cognitivo-informationnelle (la complexité intégrative) ... 70
Sur les individus à cheval entre plusieurs traditions ... 72
Les électrons libres ... 73
Autres notions de complexité ... 75
Conclusion ... 77
Acte 1 – L'ordinateur et l'interdisciplinarité ... 79
Introduction à l'Acte 1 ... 80

Chapitre 2 – Le projet épistémique des SSC 85
Introduction 85
L'importance de l'informatique 89
L'importance de la physique 93
L'importance des mathématiques 104
L'importance de la biologie 118
Conclusion 127
Chapitre 3 – La « science de la complexité » : une histoire du Santa Fe Institute 129
Introduction 129
Faire une histoire du SFI 130
Comment les SSC sont-elles devenues computationnelles ? 131
Nature de l'objet d'étude et structure du chapitre 132
Stratégies de légitimation : bâtir un domaine de recherche de toutes pièces 135
Le rôle des médias et de la vulgarisation 139
Le prestige des fondateurs 145
Les contacts avec les agences fédérales et les grandes entreprises 162
Les écoles d'été et d'hiver, puis les MOOC : construire l'identité d'une science 165
Les workshops intégratifs 170
Les publications scientifiques 173
Les journaux scientifiques 174
Les sociétés savantes 175
Les Community Lectures et les rapports avec la ville de Santa Fe 176
Les projets éducatifs pour étudiants et postdoctorants 177
Les projets d'éducation dans les lycées 179
Les prix scientifiques et autres reconnaissances 180
Une proposition de périodisation de l'histoire du SFI 181
Conclusion 190
Aparté 1 – Chapitre 4 – Pourquoi fonder le Santa Fe Institute et la « science de la complexité » ? 192
Introduction 192
Thèses et structure du chapitre 194
Structure et organisation institutionnelles 195
Les déménagements 196
Quel statut pour le SFI ? 197
L'absence de départements 198

Think tank ou pas ? ... 200
Pourquoi la ville de Santa Fe ? ... 201
Comment définir le SFI ? ... 202
Les promesses épistémiques ... 203
La tendance unificatrice des Senior Fellows ... 204
La tendance unificatrice de Goldberg et West ... 205
Les promesses adressées aux entreprises ... 210
De l'« utilité » de quelques projets ... 211
La priorité des donations privées ... 213
Quelles priorités pour les « problèmes du monde réel » ? ... 216
Le Business Network ... 218
Du BusNet *à l'*ACtioN ... 224
La gestion du SFI en tant qu'entreprise ... 229
Conclusion ... 238
Chapitre 5 – De la création à la fermeture du CREA, une histoire « pleine de bruit et de fureur » ... 241
Notes méthodologiques et thèse du chapitre ... 242
Structure du chapitre ... 244
La fondation du CREA ... 244
Une périodisation de l'histoire du CREA ... 246
Qu'est-ce que le CREA ? ... 247
L'émergence des premiers clivages ... 250
La phase dominée par Jean Petitot ... 253
Le début de la fin ... 255
L'implosion du CREA ... 256
Les affects ... 257
La figure de Paul Bourgine ... 258
Les critiques épistémiques ... 260
Les critiques politiques ... 266
La question du cours à Polytechnique ... 268
Le rapatriement du CREA à Palaiseau ... 273
La question du choix du directeur ... 276
Et si les philosophes partaient ? ... 286
Quid des tutelles ? ... 288
La fin de l'histoire ... 293

L'affrontement destructeur entre deux mondes coproduits 294
L'interne et l'externe 294
Les « visions » de Petitot et de Bourgine 295
Le nœud de l'affaire : un monde contre un autre ? 298
Conclusion 304
Chapitre 6 – L'émergence de la communauté franco-européenne des systèmes complexes 308
Introduction 308
À propos de ce chapitre 310
Un, personne ou cent mille ? 311
La « préhistoire » des SSC françaises 311
La tentative de l'Institut des Sciences de la Complexité 312
Trois dispositifs préparent le terrain 315
Une stratégie multi-échelle pour fonder une science multi-échelle 323
Les GIS : RNSC, ISC-PIF et IXXI 325
Le DIM des systèmes complexes 332
La Commission Européenne 335
La transformation de l'ISC-PIF en UPS du CNRS 340
Le rôle de la Ville et de la Région dans la pérennisation 347
L'UNESCO 348
Conclusion 354
Aparté 2 – Chapitre 7 – À propos du projet politique des SSC franco-européennes 357
Au niveau européen, business as usual 357
Un parfum de gauche technocrate et libérale ? 361
Conclusion 367
Intermède – Domaines émergents et ingénierie de l'interdisciplinarité 369
Introduction à l'Intermède 370
Comment qualifier le domaine des SSC ? 372
Introduction 372
Les différentes visions des SSC des praticiens de la complexité 372
Quatre types de représentants des SSC 375
Même les militants ne s'accordent pas sur la définition des SSC 378
La taille de la communauté internationale des SSC 383
À propos de quelques instituts de la complexité 388
Comment qualifier le domaine émergent des SSC ? 392
Limites de la littérature 392

Les plateformes méta-disciplinaires ... 399
Conclusion ... 402
Les formes du travail scientifique interdisciplinaire ... 404
De la co, pluri, inter, trans et méta-disciplinarité ... 404
Une classification du travail scientifique interdisciplinaire ... 408
Les transfrontaliers ... 411
Les ambassadeurs ... 414
Les polyglottes ... 416
Les bilingues ... 419
Les traducteurs ... 421
Conclusion ... 423
Architecture et interdisciplinarité ... 426
Le SFI ... 427
La planification de l'interdisciplinarité ... 428
Où s'engendre donc l'interdisciplinarité ? ... 433
L'ISC-PIF ... 436
Le premier siège de l'ISC-PIF ... 437
Le deuxième siège de l'ISC-PIF ... 440
La planification de l'interdisciplinarité ... 442
Où s'engendre donc l'interdisciplinarité ? ... 444
Conclusion ... 446
Acte 2 – L'ordinateur et le besoin d'une nouvelle épistémologie ... 447
Introduction à l'Acte 2 ... 448
Les quatre chapitres de cet Acte ... 450
L'approche STS ... 450
Glossaire de la modélisation et de la simulation numériques ... 454
Polysémie du mot « modèle » ... 454
Tension entre KISS & KIDS ... 454
Définitions de simulation ... 457
Le simulat ... 458
Différences entre modélisation et simulation ... 459
Friction de données et friction computationnelle ... 460
Une culture épistémique computationnelle ... 461
Quels régimes de l'administration de la preuve pour les SSC ? ... 462
Introduction ... 462

La simulation comme laboratoire digital ... 462
Sur les modalités de l'administration de la preuve ... 464
Régime de l'étalon-or ... 465
Régime statistique ... 467
Régime de la parcimonie ... 469
Le régime du backcasting ou de la rétroduction ... 474
Conclusion ... 476
Aparté 3 : Les données, le point aveugle de la philosophie des sciences numériques ... 478
Introduction ... 478
Les phases de la construction des modèles-simulations ... 478
La collecte des données ... 479
La (re)construction des données ... 480
Le « triangle épistémologique » de BioEmergences ... 489
Les phases de la modélisation en géographie quantitative ... 491
Paramétrer et calibrer ... 492
Les sources d'erreurs en biologie ... 493
La validation à BioEmergences ... 496
Les erreurs et la validation en géographie quantitative ... 497
Quelques remarques sur le mot « validation » ... 498
Conclusion ... 499
De l'épistémologie à l'onto-épistémologie ... 501
Introduction ... 501
La question ontologique ... 501
À propos de cinq onto-épistémologies ... 502
Dualistes ... 505
Agnostiques ... 511
Structuralistes ... 512
Vitalistes ... 518
Monistes ... 520
Conclusion ... 527
Aparté 4 – Chapitre 14 – Critique de la raison computationnelle ... 529
Les sciences de la complexité, des sciences immatérielles ? ... 529
De la métaphore à la métaphysique computationnelle ... 533
La raison computationnelle à l'épreuve de la critique ... 537
Conclusion ... 544

Acte 3 – L'ordinateur et le (néo)libéralisme 547
Les engagements épistémiques des spécialistes des systèmes complexes. Le cas de la géographie quantitative et de l'épidémiologie computationnelle 548
Introduction 548
L'ordinateur, le meilleur allié du néolibéralisme ? 548
Les SSC, le meilleur allié du néolibéralisme ? 551
De la géographie quantitative et de l'épidémiologie computationnelle 554
Outillage conceptuel 555
Les trois communautés d'anticipation 562
Communauté de l'innovation libérale 563
Communauté de la coconstruction autogestionnaire 594
Communauté de la prémédiation centralisée 607
Conclusion 635
Conclusion générale 638
Des SSC aux sciences computationnelles 638
Limites et ouvertures de la thèse 642
Annexe 1 – Grille de questions des entretiens 644
Biographie et complexité 644
Pratiques scientifiques et épistémologie 645
L'Institut de la complexité 646
Histoire de la discipline 647
Idéologie, métaphysique, politique, entreprise 647
Annexe II – Géographie quantitative et épidémiologie computationnelle : spécialités, prosopographie et théories 648
La géographie quantitative 648
Éléments historiques 648
Prosopographie de nos interviewés 649
Théories et modèles produits par nos interviewés 654
Conception de leur spécialité selon nos interviewés 655
L'épidémiologie computationnelle 656
Éléments historiques 656
Prosopographie de nos interviewés 658
Théories et modèles produits par nos interviewés 662
Conception de leur spécialité selon nos interviewés 663
Glossaire 666
Liste des figures 676

Bibliographie 677
Thèses, livres et articles scientifiques, articles de presse et en ligne 677
Entretiens 694
Mails 698
Commentaires 699
Archives consultées 699

Introduction générale

Comment penser la relation entre les cultures scientifiques contemporaines et l'usage grandissant de l'ordinateur dans la production des savoirs ? Cette thèse se propose de donner une réponse à telle question à partir de l'analyse historique et sociologique[1] d'un domaine scientifique paru dans les années 1980 aux États-Unis : les « sciences des systèmes complexes » (SSC).

Dans la littérature consacrée aux « sciences computationnelles »[2], aux « cultures numériques »[3] et à la « digitalisation du monde »[4], se lisent systématiquement trois postulats ou thèses, selon lesquels l'usage de l'ordinateur dans la recherche :

1. facilite et encourage le travail interdisciplinaire[5], voire transdisciplinaire[6] ;
2. nécessite une toute autre épistémologie pour aborder les connaissances produites par les simulations numériques ;
3. accompagne le capitalisme digital et concrétise dans des dispositifs[7] une vision néolibérale de la société.

Le point commun de ces trois constats est qu'ils reposent, d'une manière plus ou moins marquée, sur une forme de déterminisme technique : dans cette optique, l'ordinateur serait, à lui seul, la cause de changements considérables dans la manière de mettre en œuvre les sciences. De nombreux auteurs se sont penchés sur la question du déterminisme techn(olog)ique, soit pour en souligner les dangers, soit pour proposer de l'ignorer en raison même de ces dangers. En quoi consistent-ils ? La sociologue des sciences Sally Wyatt les condense ainsi : « One of the problems with technological determinism is that it leaves no space for human choice or intervention and, moreover, absolves us from responsibility for the technologies we make and use »[8]. Puisque le déterminisme technique implique que les développements technoscientifiques se font à l'extérieur de la société et que ceux-ci entrainent de manière unidirectionnelle des changements dans la société, une telle position érige une

[1] Dans cette thèse, nous employons de nombreux concepts (en italique) issus de l'histoire, de la sociologie et de la philosophie des sciences, qui sont décrits au fur et à mesure qu'ils sont employés ici et dans les chapitres à venir. Nous les avons collectés dans un glossaire à la fin du manuscrit. Un certain nombre de termes seront présents tout au long de la thèse et nous allons les employer et définir (en note) dans cette Introduction.

[2] Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its Influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011.

[3] Stiegler, B. (ed.), *Digital studies. Organologie des savoirs et technologies de la connaissance*, Limoges, FYP Editions, 2014.

[4] Schiller, D., *Digital Capitalism. Networking the Global Market System*, Cambridge & Londres, MIT Press, 1999.

[5] Collaboration entre sciences différentes.

[6] Collaboration entre science et société.

[7] Un dispositif est un objet multidimensionnel, fait à la fois de savoir et de pouvoir, d'humains et de non-humains : Agamben, G., *Qu'est-ce qu'un dispositif ?*, Paris, Rivages poche/Petite Bibliothèque, 2007.

[8] Wyatt, S., « Technological Determinism is Dead ; Long Live Technological Determinism », dans Hackett, E.J., Amsterdamska, O., Lynch, M. & Wajcam, J., *The Handbook of Science and Technology Studies*, Cambridge & London, MIT Press, 2008, p. 169.

barrière entre science et société et nous déresponsabilise quant à nos usages des techniques. Wyatt propose une vision de la société et des technosciences qui les voit comme inévitablement entrelacées – les ingénieurs, les scientifiques et les entrepreneurs n'œuvrant jamais en dehors de la société, et la société n'étant jamais passive vis-à-vis de la technique, car elle la réinvente, la réadapte ou la refuse dans un travail constant d'allers-retours. Et au lieu de congédier cette problématique, la sociologue propose plutôt de la prendre en compte pour ses effets performatifs. Puisqu'un certain nombre de groupes sociaux font appel au déterminisme technique pour expliquer ou répandre leurs produits, Wyatt soutient – contre ceux et celles qui suggèrent d'abandonner cette problématique de par sa nature mystificatrice –, que les visions rhétoriques et performatives de scientifiques, managers, entrepreneurs et politiques constituent un objet socialement explicable – notamment par les intérêts, par la quête de pouvoir ou par la culture de ceux et celles qui agitent le déterminisme technique.

Si l'on avait partagé une vision relevant de ce dernier, on se serait demandé quels sont les effets du numérique *sur* les sciences. Le titre de la thèse aurait alors pu être : *Qu'est-ce que l'ordinateur* fait *aux pratiques scientifiques ?* Mais nous ne nous posons pas la question dans ces termes. Les trois parties principales qui composent ce travail, dédiées à la déconstruction de ces opinions courantes à propos des sciences computationnelles, doivent être lues comme un seul geste visant à dénaturaliser autant de formes différentes de déterminisme technique, très répandues chez les scientifiques, les médias et les pouvoirs, mais aussi chez certains représentants des SHS. Ces trois constats se déclinent, chez quelques auteurs, pour s'appliquer aux sciences de la complexité en particulier, ce qui en fait davantage un observatoire idéal pour enquêter sur les savoirs numériques en général.

Les trois formes de déterminisme techn(olog)ique

L'idée selon laquelle l'ordinateur serait un facilitateur du travail scientifique interdisciplinaire est tellement répandue qu'elle est devenue banale. Dans *The new production of knowledge*, Michael Gibbons et ses collègues lient fortement le développement des technologies informatiques à l'essor de ce qu'ils appellent le « Mode 2 » – formule désignant un mode de fonctionnement de la science qui serait par nature interdisciplinaire et transdisciplinaire. Dans ce cadre, l'alliance entre de multiples sciences, et entre sciences et société, se fait depuis et à travers les infrastructures et les outils digitaux :

> « Mode 2 is critically dependent upon the emerging computer and telecommunication technologies and will favour those who can afford them. The interactions among these sites of knowledge have set the stage for an explosion in the number of interconnections and possible configurations of knowledge and skill.

> The outcome can be described as a socially distributed knowledge production system. In this system communication increasingly takes place across existing institutional boundaries. The outcome is a web whose nodes are now strung out across the globe and whose connectivity grows daily. Not surprisingly when traditional scientists begin to participate in this they are perceived to weaken disciplinary loyalty and institutional control. But contexts of application are often the sites of challenging intellectual problems and involvement in Mode 2 allows access to these and promises close collaboration with experts from a wide range of backgrounds »[9].

Gibbons et collègues nous disent que le nouveau mode de production des connaissances paru dans l'après-guerre dépend fortement du processus de digitalisation du monde et vise, en retour, à l'étendre. Le numérique a selon eux multiplié les connexions entre les domaines d'expertise, ainsi qu'entre secteurs différents de la société : universités, entreprises, État. Les auteurs ne s'étonnent pas devant la croissante infidélité disciplinaire reprochée aux scientifiques qui, attirés par les défis intellectuels indexés sur le Mode 2, n'hésiteraient pas à collaborer avec des experts, des entrepreneurs et des décideurs politiques. Dans l'optique de Gibbons et ses collègues, l'ordinateur et les technologies de la communication constituent le facteur central à la fois dans la manière dont se tissent les relations sociales, dont se construisent les savoirs et dont se réalisent les principes du Mode 2.
Ce groupe de sociologues ne fait que cristalliser une position affirmée par de nombreux auteurs par ailleurs. S'il s'agit d'une idée reçue, le problème réside moins dans la naturalisation qu'elle organise que dans l'invisibilisation des rapports de force épistémiques, métaphysiques et socio-institutionnels qu'elle accomplit. Le terrain des SSC, qui est interdisciplinaire au plus haut degré puisque presque toutes les sciences naturelles et humaines y sont convoquées, montre bien que l'ordinateur est effectivement le médiateur de dialogues transculturels, mais que cela ne se fait pas naturellement ni sur fond d'égalité. Ces collaborations interdisciplinaires nécessitent de beaucoup de travail pour être mises en place et sont traversées par des rapports de domination ou par des *asymétries de prise*[10] importantes. Les sciences convoquées, en effet, ne contribuent pas toutes de la même manière, que ce soit en termes sociaux, théoriques, techniques, ou ontologiques[11]. Ces *asymétries de prise* ne sont pas toujours

[9] Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., & Trow, M., *The new production of knowledge : the dynamics of science and research in contemporary societies*, London, Sage, 1994, p. 10.
[10] Concept introduit par le sociologue pragmatiste Francis Chateauraynaud pour rendre compte de ce que Pierre Bourdieu nommait « violence symbolique », celui d'*asymétrie de prise* se réfère aux différentes *prises* – définies comme la dynamique entre des représentations et des perceptions – que les individus et les groupes sociaux ont par rapport à des processus et à des entités naturelles ou artificielles.
[11] Concept riche, stratifié et débattu (Nef, F., *Qu'est-ce que la métaphysique ?*, Paris, Gallimard, 2004), celui d'ontologie sera défini ici très simplement comme la vision de l'être qu'un individu ou groupe attribue à quelque chose. Nous étudierons en particulier des ontologies de la nature – par exemple, l'univers est composé uniquement de matière et d'énergie ou aussi d'information ? – ainsi que des ontologies de la société – par

conflictuelles, et s'actualisent parfois d'un commun accord. Mais elles ne sont pas moins le signe d'une participation inégale des différentes *cultures épistémiques*[12] en présence. Dans les SSC, les disciplines de la physique, de l'informatique et des mathématiques dictent les régimes épistémiques et les visions du monde aux autres champs du savoir en présence au sein des instituts de la complexité. Ce sont elles qui fournissent les instruments et les techniques à tous les autres membres du collectif. Ce sont elles qui fixent les règles du jeu dans la collaboration avec les autres disciplines, lesquelles assument plutôt le rôle de donneuses de problèmes. Ainsi, la triade informatique-physique-mathématiques représente le pôle à même de pouvoir et de devoir résoudre les problèmes des autres champs du savoir.

Venons-en au deuxième point, la conviction selon laquelle les sciences computationnelles nécessiteraient un tout autre outillage philosophique pour être correctement pensées. Elle est aussi très répandue dans la littérature humaniste sur le sujet. De nombreux travaux sur la simulation numérique soulignent la nouveauté absolue que ce nouvel instrument qu'est l'ordinateur représente pour la science et pour la réflexion *sur* la science. Selon certains auteurs, des pans entiers de la spéculation philosophique devraient être écrits à nouveaux frais, si l'on veut saisir la spécificité de la digitalisation des sciences. Les philosophes Roman Frigg et Julian Reiss ont repéré, dans la littérature philosophique sur le sujet, quatre axes principaux selon lesquels la simulation représenterait une nouveauté absolue pour la réflexion : métaphysique (la simulation représente un monde parallèle) ; épistémique (la simulation a besoin d'une nouvelle épistémologie) ; sémantique (la simulation se réfère aux systèmes réels d'une manière nouvelle) ; et méthodologique (la simulation occupe une troisième place entre la théorie et l'expérience)[13]. Ce que montre notre terrain sur les SSC, c'est que les formes de l'administration de la preuve en vigueur dans ce secteur des sciences

---

exemple, les êtres humains sont déterminés et donc prédictibles ou dotés de libre arbitre et donc imprédictibles ? En philosophie la métaphysique étudie, au sens aristotélicien, les modalités et propriétés des différentes formes de l'être (par exemple le vrai ou le devenir) ou, au sens kantien, les modalités de la connaissance (à savoir les transcendantaux de la gnoséologie), tandis que l'ontologie étudie l'être en tant qu'être. Tout en étant conscient de cela, nous traiterons les deux termes comme des synonymes.

[12] Concept introduit par la sociologue allemande Karin Knorr-Cetina, il s'agit d'un amalgame de dispositions et de mécanismes sociaux, d'un ensemble de savoirs théoriques et pratiques, ainsi que d'un certain nombre de règles techniques et institutionnelles, qui façonnent la production de la connaissance d'un certain groupe d'individus : Knorr-Cetina, K., *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge, Harvard University Press, 1999. Inspirée de la conception anthropologique de la culture et conçue pour contrecarrer l'idée du Cercle de Vienne selon lequel la science tout entière suit une seule manière de fonctionner, cette notion implique l'existence d'une variété de manières de produire du savoir qui sont liées aux différences sociales, matérielles et symboliques des groupes pris en examen. Ce concept nous intéresse pour sa capacité à inclure tous les aspects composant la vie des cultures scientifiques et parce qu'il n'établit pas un niveau unique de pertinence, pouvant être décliné à toutes les échelles : celle d'un laboratoire, celle d'une spécialité, celle d'une discipline, etc. Plus tard, Knorr-Cetina élargira et complétera ce concept avec celui d'*arène transépistémique*, pour dépasser les frontières du laboratoire et indiquer tous les espaces où les scientifiques, les administrateurs, les experts, les entrepreneurs et les décideurs se rencontrent pour discuter, financer et mettre en place les technosciences : Knorr-Cetina, K.D., « Scientific Communities or Transepistemic Arenas of Research ? A Critique of Quasi-Economic Models of Science », *Social Studies of Science*, 1982, n. 12, pp. 101-130.

[13] Frigg, R. & Reiss, J., « The philosophy of simulation : hot new issues or same old stew ? », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 593-613.

computationnelles ne s'éloignent pas de celles des disciplines classiques qui sont convoquées, notamment la physique, l'informatique et les statistiques. La nécessité d'une nouvelle épistémologie pour penser les connaissances produites par le biais de l'ordinateur est relativisée par notre matériau empirique, qui conduit plutôt à opérer un déplacement de regard vers les visions métaphysiques de nos interviewés. Dit autrement, plutôt que de s'interroger sur les conditions de validité de la connaissance produite par les scientifiques de la complexité en fonction de l'usage de l'ordinateur, privilégions plutôt la réflexion sur les ontologies telles qu'elles se forment en relation avec des épistémologies et des pratiques vieilles et nouvelles. Nous avons pu observer que les visions métaphysiques des scientifiques étudiés comptent beaucoup dans la détermination de leurs épistémologies. Il est donc sans doute plus utile de parler de positions *onto-épistémologiques*[14] que d'une nouvelle épistémologie, si l'on veut vraiment comprendre comment les scientifiques computationnels croient en leurs modèles et comment ils se rendent crédibles devant leurs pairs ou devant des groupes sociaux différents du leur.

Le troisième point repose sur une autre idée répandue, selon laquelle la digitalisation du monde renouvelle et fortifie le régime néolibéral hégémonique dans le monde. Si on peut définir *a minima* le néolibéralisme comme l'abattement graduel des frontières et la facilitation de la circulation des capitaux, des marchandises et des personnes, la fluidification digitale ne peut qu'être vue, dans cette optique, comme le canal principal de la nouvelle phase de globalisation. Ainsi, on retrouve souvent, dans plusieurs littératures différentes, une association entre le déploiement de l'infrastructure digitale et le déploiement planétaire du capitalisme. Les ordinateurs et toute la trame numérique qu'ils incorporent y sont vus comme des facteurs accompagnant, voire encourageant ce processus. Par exemple, dans un livre sur le « capitalisme digital », l'historien américain Dan Schiller s'attèle à déconstruire la grande promesse (qu'il qualifie de millénariste), qui d'après lui voit dans le monde en réseau la solution à tous les maux de l'humanité, pouvant apporter des améliorations dans le domaine de l'éducation, dans celui de l'économie, comme dans celui de la démocratie[15]. En réalité, d'après cet auteur, « [à] travers leur largeur et leur profondeur, les réseaux d'ordinateurs se connectent avec le capitalisme existant pour élargir massivement la portée effective du marché »[16]. Selon l'historien de l'économie Richard DuBoff, que Schiller cite dans son ouvrage, la globalisation digitalisée implique une internationalisation des flux financiers et économiques beaucoup plus intégrée et contraignante pour les politiques des États-Nations, et ceci bien que le capitalisme ait

[14] Nous définirons ce concept dans le chapitre 13, mais on peut d'ores et déjà le décrire comme l'ensemble des visions épistémologiques et ontologiques qu'un individu ou qu'un groupe social ont de la nature et de la société, visions qui se révèlent inséparables et toujours dépendantes les unes des autres. Ainsi, chacun suivra certaines règles de validité de la connaissance en fonction de sa vision de l'essence du monde ou alors fera référence à une certaine ontologie en fonction d'une épistémologie donnée.

[15] Schiller, D., *Digital Capitalism*, *op. cit.*

[16] *Ibid.*, p. XIV.

toujours été international. Schiller considère le processus de digitalisation du monde comme « le bord d'attaque d'une telle transnationalisation épique de l'activité économique »[17]. Dans sa perspective, les « [r]éseaux sont en train de généraliser directement l'étendue sociale et culturelle de l'économie capitaliste comme jamais auparavant » – d'où sa formule de « capitalisme digital »[18]. En citant directement les sciences de la complexité, les historiens des sciences Yannick Mahrane et Christophe Bonneuil écrivent que le monde néolibéral s'est mis en place grâce aux connaissances fondées sur l'étude de systèmes complexes adaptatifs (formule issue du Santa Fe Institute, le centre de recherche qui a lancé la formule de « *complexity science* »). À partir du cas d'étude représenté par le marché des biens environnementaux, ces deux chercheurs affirment qu'un « nouveau régime de gouvernementalité néolibérale de l'environnement s'est […] progressivement établi » depuis les années 1980. Un tel régime a pu s'affirmer en s'articulant

> « à un nouveau régime de savoir-pouvoir sur le vivant cherchant à redéfinir les systèmes socio-économiques et naturels comme des systèmes complexes, adaptatifs, soumis à des perturbations constantes, exigeant une reconfiguration des institutions en charge de la gestion environnementale et une extension des mécanismes du marché jugés plus flexibles et cognitivement supérieurs »[19].

Notre travail de terrain, mené dans plusieurs instituts de la complexité en Europe et aux États-Unis, confirme d'une part l'existence de contacts biunivoques entre théories de la complexité et théorie et pratique du néolibéralisme, mais d'autre part il nous permet d'enrichir le tableau, en montrant que les scientifiques associés à ce type d'instituts peuvent s'engager dans la production de visions des systèmes complexes autres que celle portée par Friedrich von Hayek ou par ses adeptes. Pour le dire autrement, le domaine technoscientifique étudié ici impose de corriger, sinon démentir, l'idée selon laquelle le digital s'allierait naturellement et dans tous les contextes avec la vision d'un capitalisme globalisé interconnecté, fluide et plat. Nous montrerons au contraire que l'ordinateur peut être enrôlé dans des visions du monde différentes, voire contraires à celle-ci.

Les sciences et l'idiome de la complexité

Les SSC forment un domaine interdisciplinaire, constitué de nombreuses sciences naturelles et sociales différentes, qui se proposent d'étudier les objets propres à chacune d'elles par le biais d'outils computationnels, physiques et mathématiques. La notion de « système complexe » – ensemble intégré d'éléments, souvent hétérogènes,

[17] *Ibid.*
[18] *Ibid.*
[19] Pestre, D. (ed.), *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*, Paris, La Découverte, 2014, p. 163.

en interaction réciproque et en évolution pérenne – est censée pouvoir recouvrir des objets aussi divers que les états condensés de la matière, les réseaux génétiques, les fourmilières, les écosystèmes, les marchés financiers ou les villes. Apparues dans les années 1980, les SSC se sont construites à partir des activités d'entrepreneurs scientifiques[20] qui ont su mobiliser autour de deux grandes promesses, l'une épistémique et l'autre politique : la promesse de mettre en place un domaine de recherche capable d'intégrer une diversité de savoirs sur la nature et sur la société pour les rendre plus efficaces et exacts ; une offre de solutions face à des problèmes du monde contemporain particulièrement difficiles à surmonter – de l'effondrement des écosystèmes à l'explosion des pandémies, en passant par les problèmes de la croissance économique, de la planification urbaine ou du fonctionnement de la démocratie. Un extrait issu d'un des nombreux livres enthousiastes qui existent dans le commerce illustrera le genre de propos qui, à partir des années 1990, ont souvent été tenus à l'égard des sciences de la complexité :

> « As we deepen our understanding of how the mental world of meaning is materially supported and represented, an understanding coming from the neurosciences, the cognitive sciences, computer science, biology, mathematics, and anthropology, to name but a few contributing sciences, there will result a new synthesis of science, and a new cosmopolitan civilization and cultural worldview will arise. I am convinced that the nations and people who master the new sciences of complexity will become the economic, cultural, and political superpowers of the next century »[21].

L'ambition manifeste des promoteurs des SSC semble expliquer en grande partie l'exceptionnel engouement qui, à travers des individus et des groupes très divers, s'est manifesté en faveur de ce domaine au cours des dernières décennies. En dehors des instituts explicitement inscrits dans l'étude de la « complexité » et des « systèmes complexes », ces deux termes sont en effet de plus en plus évoqués depuis les années 1980 :

- dans les milieux scientifiques : on en parle dans les sciences du climat, dans le domaine des nanotechnologies, dans celui des neurosciences, des sciences du système Terre, de l'informatique ou de l'ingénierie, ou encore de la psychologie, etc. ;

[20] Dans la littérature STS, l'expression d'« entrepreneur-scientifique » (avec un tiret) a été souvent utilisée pour nommer ces chercheurs et chercheuses qui mélangent leurs activités de recherche avec leurs activités entrepreneuriales. Dans cette thèse, nous utiliserons ce terme (sans tiret) pour indiquer ces scientifiques qui œuvrent, tels que des entrepreneurs (sans l'être toutefois au sens littéral), afin de fonder un institut, lancer un domaine, repérer des fonds, tisser des relations politiques, etc.

[21] Pagels, H.R., *The Dreams of Reason. The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*, New York, Bantam Books, 1989, p. 15.

- dans les milieux politiques : comme par exemple dans les rapports de la RAND Corporation, dans ceux de la Maison Blanche, dans les discours des chefs d'État ou de gouvernement de plusieurs pays, ou bien, en France, dans les Stratégies Nationales de la Recherche ;
- dans les discours des mouvements sociaux : si tous les collectifs et les ONG écologistes sont désormais sensibilisés à la problématique des interdépendances et de la complexité de la bio-socio-sphère, certains, tel le mouvement des *Transition Towns*, se réclament explicitement des SSC ;
- dans les milieux économiques : on peut penser aux manuels de management, ou aux livres grand public sur la gestion efficace des entreprises, ou encore aux mouvements sociotechniques de développement urbain comme celui des *smart cities* ;
- dans la presse de vulgarisation : de multiples articles et numéros thématiques portent sur la thématique de la complexité, des SSC ou des réseaux ; digne de mention est la fameuse phrase de Stephen Hawking sur le fait que « le XXI^{ème} sera le siècle de la complexité » ;
- il faut compter aussi avec la culture populaire et les milieux artistiques : il suffit de penser à la remarquable diffusion des figures de fractales, divulguées dans les magazines de toute sorte, voire sous forme de *desktop* ou d'affiche ; des références à la complexité sont faites également dans les campagnes publicitaires, de manière souvent souterraine dans des films et des *best sellers*, ainsi que dans des expositions d'art contemporain (où les instituts de la complexité ont parfois été directement impliqués).

Face à cette diffusion du répertoire lexical développé par les sciences de la complexité, on pourrait avoir l'impression d'assister à un changement de paradigme tel que celui opéré par les découvertes de Newton, d'Einstein ou de la mécanique quantique. Dans ces trois cas issus de la physique, il ne s'agit pas seulement d'un basculement théorique et pratique concernant les physiciens. À chaque fois qu'une nouvelle théorie de cette envergure est produite et devient consensuelle dans les milieux savants, la manière de voir le monde et de le traiter dans et par la physique est reconfigurée. On sait qu'un changement de paradigme comporte, selon l'historien et philosophe des sciences Thomas Kuhn, la soumission au nouveau cadre théorique général de toute nouvelle théorie locale ou de tout nouveau modèle particulier, qui à partir de là doivent s'accorder avec l'échafaudage épistémique désormais hégémonique. Mais ces basculements paradigmatiques ont à chaque fois affecté les autres secteurs de la société, jusqu'à la manière dont les citoyens et les citoyennes ordinaires voient le monde. Ainsi, l'omniprésence du langage de la complexité pourrait faire penser à l'essor, aujourd'hui, d'une nouvelle révolution paradigmatique, générée encore une fois dans les sciences naturelles et déjà étendue à tous les secteurs de la société.

À la suite de ce travail de recherche mené au contact de plusieurs groupes sociaux impliqués dans la pratique et dans le développement des SSC, nous gardons une certaine prudence quant à ce type d'interprétation globale. Comme nous le verrons dans le chapitre 8 dédié au statut socio-épistémique de ce domaine, les sciences de la complexité apparaissent plutôt comme une coalition de sous-disciplines afférentes à plusieurs domaines des savoirs, qui trouvent les raisons de leur alliance dans au moins trois éléments : une vision commune des sciences, des institutions scientifiques, de la nature et de la société, inspirée des réseaux computationnels ; un intérêt partagé pour des techniques numériques, jugées hautement performantes et particulièrement pertinentes pour le genre de systèmes étudiés (multi-échelles, hétérogènes, évolutifs, etc.) ; et le fait d'occuper, chacune à sa manière, une place relativement marginale dans le plus vaste champ disciplinaire qui leur est propre. Certains des protagonistes de la mouvance de la complexité ont conçu et disséminé des outils d'analyse qui ont bénéficié d'un succès scientifique, politique, commercial et médiatique incontestable : il suffit de penser aux techniques d'analyse des « réseaux » ou aux « modèles à base d'agents » (MBA). Mais il n'existe pas *une* théorie générale de la complexité, qui aurait d'abord reconfiguré les savoirs scientifiques et ensuite la société tout entière. Ce qui a traversé les enceintes des laboratoires et des agences (inter)nationales de recherche, les conférences et les revues scientifiques dédiées à l'étude des systèmes complexes, et qui a colonisé d'autres espaces sociaux, n'est pas *une* théorie générale comme la théorie de la relativité d'Einstein. Il s'agit plutôt d'une *rhétorique* de la complexité, d'un jargon composé de quelques mots clés. Un tel constat ne vise pas à minorer la portée de ce domaine dans les sciences et au-delà, car l'idiome de la complexité n'est pas moins porteur d'une vision particulière du monde, des savoirs et de la nature. En tant que tel, il est capable d'entrer en forte résonance avec des cultures, des comportements, des stratégies de marché ou des politiques publiques. Notre constat vise plutôt à mieux cerner la spécificité de cet objet nommé « complexité » et à montrer – en suivant l'historien des sciences américain Lambert Williams[22] – que ce sont surtout les efforts sur le plan médiatique exercés par certains représentants des SSC, ainsi que par une poignée de journalistes scientifiques à succès, qui ont répandu cet idiome au-delà des frontières des instituts et des sociétés savantes engagés dans ce secteur de la recherche. L'autopromotion, ainsi qu'un certain succès d'image, sont des caractéristiques propres à beaucoup des protagonistes des théories de la complexité, ce qui n'est pas toujours le cas dans les autres domaines de la recherche scientifique ou technoscientifique.

Malgré l'engouement général vis-à-vis de cette mouvance, qui hérite en partie de celle de la « théorie du chaos », nous constatons la rareté de titres scientifiques, inscrits dans une des disciplines des sciences humaines et sociales (SHS), qui soient dédiés à une

[22] Williams, L., *Modeling, Building, Writing : A History of Nonlinear Dynamics and Complex Systems*, Thèse de Doctorat, Harvard University, 2012.

étude approfondie des sciences de la complexité. Mise à part la pléthore de textes à caractère vulgarisateur, qui suivent par définition un autre style et répondent à d'autres finalités, les textes d'anthropologie, d'histoire, de sociologie ou de philosophie visant à analyser les institutions, les pratiques, les ontologies et les engagements des représentants des SSC ne sont pas légion. Loin de pouvoir expliquer les raisons de cet angle mort de la littérature, en partie sans doute lié à la nature vaporeuse du domaine, nous avons donc trouvé devant nous, lors des premiers moments de l'enquête, un objet fort intéressant, car présent dans plusieurs arènes sociétales mais restant entièrement à cerner, à étudier, à défricher du point de vue des sciences sociales.

Les sciences computationnelles à la lumière des sciences de la complexité

Lors de la réalisation de notre maîtrise en histoire et sociologie des sciences, aboutissement d'un parcours philosophique précédent, nous avions mené des recherches sur cet objet intriguant, du fait de son hétérogénéité et de son aspiration à la fois englobante et épistémiquement subversive, en l'abordant sous la question du réductionnisme et sous celle du paradigme au sens de Kuhn. Est-ce que les SSC sont *réellement* antiréductionnistes comme leur nom l'indique ? Est-ce qu'elles sont devenues un paradigme scientifique omniprésent et général, comme leurs discours le prétendent ? Telles étaient nos questions de recherche dans un premier temps. Graduellement nous avons abandonné ces questionnements – que nous jugeons aujourd'hui scolastiques et normatifs –, pour nous intéresser à des objets, des approches et des cadres plus proches du domaine des *Science & Technology Studies* (STS), qui s'inspire davantage de l'anthropologie que de la philosophie – du moins du point de vue méthodologique. La thèse a donc été l'occasion pour nous d'accomplir la conversion de nos interrogations philosophiques initiales en des questionnements d'ordre historique et sociologique. Au début de notre recherche doctorale, c'est une problématique descriptive qui a guidé les premiers travaux de terrain : il s'agissait simplement de connaître et cerner les personnes, les lieux et les processus qui allaient sous le nom de SSC. Mais au fur et à mesure que les problématiques sociohistoriques se spécifiaient, en s'inscrivant dans des contextes plus vastes, nous avons dû explorer les formes de montée en généralité qu'un objet difficile à saisir, même si (ou précisément parce que) apparemment ubiquitaire, nous permettait d'opérer, notamment autour du rapport entre outils numériques et pratiques scientifiques.

L'essor de l'ordinateur dans les années 1940 a d'abord affecté la physique nucléaire, puis les sciences du climat et, graduellement, tous les autres domaines du savoir[23]. La croissante digitalisation des pratiques scientifiques a ouvert le champ à des nouvelles questions épistémologiques, métaphysiques et sociales. Depuis les années 1990, les

[23] Dahan, A. & Pestre, D. (ed.), *Les sciences pour la guerre. 1940-1960*, Paris, EHESS, 2004 ; Fine, G.A., *Authors of the Storm. Meteorologists and the Culture of Prediction*, Chicago, University Of Chicago Press, 2010 ; Heymann, M., Gramelsberger, G. & Mahony, M., *Cultures of Prediction in Atmospheric and Climate Science. Epistemic and Cultural Shifts in Computer-based Modelling and Simulation*, London, Routledge, 2017.

SHS ont intégré graduellement la question des « sciences computationnelles » ; en témoigne la vaste littérature qui a été produite depuis autour de ce domaine[24]. Les sciences de la complexité sont l'une des manifestations du tournant numérique dans les sciences – caractérisé par l'emploi massif de l'ordinateur, des grilles de calcul, des outils informatiques dans la modélisation de la nature –, mais en même temps l'un des lieux privilégiés pour enquêter sur un certain nombre de problématiques qui concerne les sciences computationnelles dans leur ensemble. Les SSC représentent en effet un excellent terrain pour interroger – et éventuellement confirmer, invalider ou complexifier – plusieurs rayonnages de littératures autour d'une série de thématiques, telles que les pratiques de l'interdisciplinarité, les modalités de l'administration de la preuve ou les formes d'engagement politico-économique des scientifiques. Si le domaine concernant les « cultures numériques » donne lieu à des enquêtes sur ce que les technologies digitales « font » aux sociétés humaines[25], de leur côté les SSC nous permettent d'enquêter plus spécifiquement sur les pratiques scientifiques liées à l'emploi de l'ordinateur. L'expression « à la lumière de », contenue dans le titre de cette section, renvoie aux éclairages que cet objet hétérogène nous permet d'apporter à l'égard des épistémologies, des pratiques et des engagements des chercheurs et des chercheuses qui font des outils d'enquête, de communication et de stockage numériques leurs outils de travail quotidien. La référence à la lumière est, en outre, un clin d'œil à la vision du monde et à l'infrastructure électrique sur lesquelles reposent les SSC : un monde en réseau est abordé par des machines informatiques interconnectées en réseaux. La mise en réseau concerne non seulement le monde et l'infrastructure pour l'étudier, mais les relations sociales qu'entretiennent les représentants du domaine. L'idée des *styles de pensée* formulée par Ludwig Fleck, pour qui le cadre dans lequel les objets d'étude des scientifiques modifient à la fois leurs modes de connaissance et leurs structures sociales[26], trouve ici sa pleine pertinence.

[24] Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A., « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'histoire des sciences*, 2004, Tome 57, n. 2, pp. 243-303 ; Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences*, *op. cit.* ; Lenhard, J., Küppers, G. & Shinn, T. (ed.), *Simulation*, Dordrecht, Springer, 2006 ; Morgan, M.S., *The World in the Model. How Economist Work and Think*, New York, Cambridge University Press, 2012 ; Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K., « Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences », *Science*, New Series, 1994, vol. 263, n. 5147, pp. 641-646 ; Pias, C., « On the Epistemology of Computer Simulation », *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung*, 2011, vol. 2011, n. 1, pp. 29-54 ; Sismondo, S., « Models, simulations, and their objects », *Science in Context*, 1999, vol. 12, n. 2, pp. 247-260 ; Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 1, vol. 1: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2013a ; Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 1, vol. 2: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2013b ; Varenne, F., Silberstein, M., Dutreuil, S. & Huneman, P. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 2: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2014.

[25] Gere, C., *Digital Culture*, Londres, Reaktion Books, 2002.

[26] Fleck, L., *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Paris, Flammarion, 2008.

Dispositif d'enquête

Loin de vouloir naturaliser et figer notre vision des SSC, nous emploierons cette abréviation pour désigner les scientifiques de différentes disciplines ou *cultures épistémiques* qui, à un moment ou à un autre de leur carrière, se sont inscrits, pour des raisons variées, dans le domaine de l'étude des systèmes complexes. L'entreprise de caractérisation de la production de savoirs des sciences de la complexité ne passera donc pas par la recherche d'une définition essentialiste de ce qu'elles sont, mais par une étude de ce qui est fait en leur nom. Si les STS ont mis les technosciences au pluriel en portant l'attention sur leur nature processuelle, a fortiori un domaine si indéterminé et instable comme celui des SSC est marqué par un pluralisme et un dynamisme éloignant de toute essentialisation. D'un point de vue empirique, nous avons eu à faire avec des institutions, des pratiques de recherche et des formes d'engagement. Nous avons appréhendé ces éléments par le biais de l'analyse de différents types de discours (entretiens, textes scientifiques, textes de vulgarisation, conférences, manifestes programmatiques) et de séries d'archives (institutionnelles, politiques, personnelles). Nous avons intégré ces matériaux par des observations, par des visites de laboratoire et par de courtes séquences ethnographiques. Au début de notre enquête, nous avions adopté l'ethnographie comme méthodologie principale, à côté de celle des archives. Mais nos questionnements conduisant à prendre en compte un grand nombre de points de vue et la nature diffuse des SSC, nous l'avons vite abandonnée pour lui préférer l'enquête par entretien. Nous nous sommes aperçu en effet qu'il valait mieux, du moins dans la phase de défrichage d'un domaine peu connu, multiplier les interviews – approfondies – que les ethnographies de laboratoire. Le domaine n'ayant jamais été étudié de manière systématique, il était nécessaire de circuler le plus possible entre des espaces et des cultures différents plutôt que de mener un travail anthropologique approfondi mais trop localisé.

Comment avons-nous repéré les personnes à interviewer ? En identifiant tout d'abord les centres de recherche sur des critères d'auto-identification et de centralité dans le domaine des SSC. Selon le nombre de publications, des discours et des efforts institutionnels, ainsi que d'affiliés, les deux foyers les plus actifs sur les sols américain et européen dans la fondation et la diffusion des SSC résultent être : le Santa Fe Institute (SFI) à Santa Fe, Nouveau Mexique, et l'Institut des Systèmes Complexes de Paris, Île-de-France (ISC-PIF). Ensuite, nous avons exploré les marges de ces deux institutions pour essayer de cerner les zones frontières de ces « réseaux » sociaux, et détecter des régularités et des différences sur une échelle plus vaste, aussi bien que pour diversifier et enrichir notre matériau sociologique. On a ainsi repéré d'autres instituts de la complexité – en Belgique, en Espagne, en Italie, aux États-Unis – ainsi que d'autres individus – en Allemagne, en Angleterre – se réclamant, dans leurs articles scientifiques ou sur leurs sites institutionnels, de l'étude des systèmes complexes.

Au total, plus de 220 entretiens en direct et par mail – pas tous exploités dans cette thèse – ont été réalisés entre l'Europe et les États-Unis. Ils ont duré en moyenne deux heures, avec des conversations de quinze minutes d'un côté (dans le cas de courtes interviews à la marge de conférences) et de quatre heures et demi de l'autre. Il s'est agi d'entretiens semi-directifs : un noyau de questions (prosopographie, vision personnelle du champ des SSC, description des instituts de la complexité, etc.) était le même pour tous les enquêtés ; un ensemble de questions était identique selon les groupes sociaux enquêtés (histoire du SFI pour les associés à l'institut, définition de modélisation et simulation numériques pour ceux et celles qui en faisait un usage quotidien, etc.), tandis qu'un certain nombre de questions variait en fonction de la personne interviewée mais aussi en fonction de l'état d'avancement de nos recherches (voir l'annexe 1 pour la grille de questions). Les interviews se sont déroulées dans la vaste majorité des cas en face-à-face, surtout dans les locaux institutionnels et moins souvent en dehors (bars, brasseries, dans la rue, etc.). Quelques fois, notamment dans le cas d'entretiens exploratoires ou complémentaires, nous avons utilisé le logiciel Skype, le téléphone et, dans un seul cas, le service vocal de l'application mobile WhatsApp.

Le travail d'archive le plus poussé a concerné le SFI, la seule institution à en disposer de manière complète et à un seul endroit, les boîtes ayant été organisées et collectées de manière systématique depuis la fondation du laboratoire à l'initiative de sa bibliothécaire. Pendant notre séjour d'un mois auprès de cet institut américain, nous avons digitalisé, pendant les pauses entre un entretien et l'autre, la presque intégralité des archives présentes. Nous les avons analysées par la suite une fois rentré en France. Les archives concernant le CREA et l'ISC-PIF nous ont été communiquées par email ou à la main par les (ex)directeurs ou les (ex)associés. Si les archives du SFI pouvaient contenir des statuts, de la correspondance, des projets de recherche, des rapports de recherche, des verbatim de réunions, des planimétries, des dépliants informatifs ou des coupures de presse, les archives des institutions françaises contenaient surtout des statuts, de la correspondance, des planimétries et des manifestes programmatiques.

Les observations et les courtes ethnographies ont concerné le déroulement d'une réunion administrative, d'un workshop, d'une conférence ou d'une expérience de laboratoire, n'ayant jamais duré plus que quelques jours. Le caractère impressionniste de ces enquêtes ne permet pas des analyses anthropologiques ou de micro-histoire en profondeur d'une communauté, mais elles nous ont été utiles pour découvrir des problématiques, pour saisir des styles et des pratiques de recherche et pour ensuite diriger nos entretiens dans la direction la plus pertinente.

Approche théorique et onto-épistémologie

Notre approche théorique est polyphonique, multiple. Si notre enquête s'inscrit dans l'histoire et dans la sociologie des sciences, la philosophie a nourri nos

questionnements et l'anthropologie a influencé notre posture et notre style[27]. Trois pôles de littératures, se chevauchant souvent, constituent l'armature théorique principale de notre démarche.

Un premier pôle est celui d'une histoire intellectuelle et sociale, qui entreprend une restitution détachée et symétrique des récits choisis. Il ne s'agit pas de faire une histoire des idées, comme si les personnes, les institutions, la matérialité, les idéologies[28] n'avaient pas de pertinence explicative pour les courants de pensée. Il n'est pas non plus seulement question d'éviter les anachronismes et le réductionnisme d'une certaine historiographie normative, qui tend à rabattre une histoire complexe sur un ou quelques individus-clés et à juger de la pertinence d'un récit à la lumière des paradigmes en vigueur à l'heure où l'historien écrit. Il s'agit pour nous aussi d'attribuer la correcte qualification aux sources employées : souvent, en effet, les chercheurs et les chercheuses produisent des lectures historiographiques du domaine auquel ils ou elles appartiennent – c'est notamment le cas des SSC. L'historien des intellectuels Wolf Feuerhahn propose de qualifier ces histoires comme *indigènes* et de les considérer plutôt comme des sources primaires, à côté des productions scientifiques des groupes sociaux étudiés, que comme des sources secondaires[29]. Une telle mise à distance permet à l'historien de ne pas jouer le jeu d'une faction particulière à l'intérieur des groupes sociaux étudiés et d'être embarqué dans des rivalités qui ne sont pas les siennes. Dans le cadre d'une histoire du présent comme la nôtre, il est aussi important d'être attentifs aux risques liés au maniement des sources orales. La mémoire opère des sélections des événements passés en fonction des exigences (sociales, économiques, institutionnelles, politiques) du présent[30]. Les personnes

[27] Nous partageons les mots de Jeanne Favret-Saada : « Un précepte de l'anthropologie britannique – le seul, peut-être, au nom de quoi je puisse me dire ethnographe – veut que l'indigène ait toujours raison, qui entraîne l'enquêteur dans des directions imprévues. Que l'ethnographe puisse être ainsi dérouté, que rien de ce qu'il trouve sur le terrain ne corresponde à son attente, que ses hypothèses s'effondrent une à une au contact de la réalité indigène, bien qu'il ait soigneusement préparé son enquête, c'est là le signe qu'il s'agit d'une science empirique et non d'une science-fiction » : Favret-Saada, J., *Les mots, la mort, les sorts*, Paris, Seul, 1977, p. 31.

[28] Terme controversé et historiquement stratifié, celui d'idéologie (le seul, avec le terme d'ontologie, que nous laisserons sans italique de par son usage courant) est à comprendre ici de manière non-péjorative, comme un ensemble d'idées et de valeurs universellement présent chez tous les êtres humains de toute époque et de toute culture. Comme le dit Paul Ricœur, « l'idéologie désigne au départ un processus de distorsion ou de dissimulation par lequel un individu ou un groupe exprime sa situation, mais sans la connaître ou la reconnaître » : Ricœur, P., *L'idéologie et l'utopie*, Paris, Seuil, 1997, p. 17. Or, même si l'anthropologue américain Clifford Geertz s'inscrit dans un courant de pensée qui partage peu avec l'approche défendue ici, nous citerons sa définition de l'idéologie car c'est l'une des rares qui n'est pas normative ou péjorative : « ideologies [can be seen] as systems of interacting symbols, as patterns of interworking meanings » : Geertz, C., *The Interpretation of cultures*, New York, Basic Books, 1973, p. 207. À partir de celle-ci, nous définissons l'idéologie, de manière plus articulée, comme un ensemble d'au moins trois éléments : 1) une axiologie, à savoir un ensemble de valeurs esthétiques et éthiques ; 2) une métaphysique, à savoir une certaine vision de l'être du monde social, du monde naturel et (pas toujours) du monde spirituel ; et 3) une préférence pour une certaine vision de l'ordre social.

[29] Feuerhahn, W., « Instituer les neurosciences sociales. Quelle histoire pour un nouveau label ? », dans Ambroise, B. & Chauviré, C. (ed.), *Raisons pratiques*, n. 23, 2013, pp. 115-137.

[30] Gaudillière, J.-P., « The Living Scientist Syndrome : Memory and History of Molecular Regulation », dans Söderqvist, T., *The Historiography of Contemporary Science and Technology*, New York, London, Routledge, 1997, p. 409.

ordonnent leurs récits en fonction du contexte de l'entretien et de l'interaction avec celui ou celle qui les interroge. L'entretien oral n'est toutefois pas plus ou moins utile et problématique que tout autre source dont disposent l'historien et le sociologue. Comme l'a écrit l'historien anglais Paul Thompson, les sources – qu'elles soient sous forme d'entretiens, de statistiques, de correspondance, d'articles de presse ou autre – « représentent toutes […] la *perception sociale* des faits ; et elles sont toutes soumises également aux pressions sociales du contexte dont elles proviennent »[31]. C'est la « *signification sociale* » de ces sources que nous recevons quand nous y avons accès, « et c'est cela qui, selon Thompson, doit être évalué »[32]. La règle d'or consiste, par conséquent, dans le croisement de sources plurielles, hétérogènes et pluralistes en termes de représentativité du groupe social pris comme objet.

Le deuxième pôle de littérature sur lequel nous nous sommes basé pour notre échafaudage conceptuel est celui des STS. Fortement inspirée de l'anthropologie et radicalement opposée au platonisme typique de l'épistémologie traditionnelle, cette littérature est attentive à la matérialité des cultures scientifiques, et donc aux pratiques, aux techniques, aux manipulations, aux habitus et aux connaissances tacites[33] :

> « STS, écrit le sociologue John Law, grew up in debate with philosophers. While epistemologists usually argue that scientific method is philosophically special […], STS ethnographers and sociologically inclined historians of science are more impressed by the messy mundanity of laboratories. In the STS way of thinking, laboratory work […] often looks more like cookery than cogitation »[34].

La philosophie des sciences s'est souvent contentée de décrire les intentions et les pratiques cognitives des savants, faisant fi des contextes matériels sur fond d'un idéalisme plus ou moins implicite. Elle est très souvent objectiviste, réaliste, pourrait-on dire, en un mot, anti- ou pré-STS. Si elle n'est pas toujours une philosophie computationnelle, elle est très souvent une philosophie du tout-langage. Elle est souvent bien plus détaillée que la sociologie sur certains points, mais finit par perdre la bonne distance vis-à-vis des savants qu'elle étudie. Trop souvent elle tranche et devient normative – même lorsqu'elle se pose comme une activité descriptive – au lieu de restituer et respecter le pluralisme des points de vue. Pour toutes ces raisons, les

[31] Thompson, P., *The voice of the past : oral history*, Oxford, Oxford University Press, 1978, p. 124.
[32] *Ibid.*
[33] « Dans l'action quotidienne, au laboratoire, c'est souvent l'usage qui fait preuve, c'est le fait de juger utiles et fiables des techniques (matérielles ou conceptuelles) qui importe – c'est le fait de pouvoir aller de l'avant, de progresser grâce à elles. Paraphrasant Ian Hacking, on pourrait dire que c'est moins de prouver l'existence des ondes (ou de les rendre visibles) qui convainc que de les manipuler » : Atten, M. & Pestre, D., *Heinrich Hertz. L'administration de la preuve*, Paris, PUF, 2002, pp. 108-109.
[34] Law, J., « The Materials of STS », dans Hicks, D. & Beaudry, M.C., *The Oxford Handbook of Material Culture Studies*, Oxford, Oxford University Press, 2010, p. 177.

philosophes des sciences constituent souvent à la fois des collègues avec qui débattre et des « acteurs » à analyser avec les scientifiques examinés[35].

L'« histoire sociale des sciences » proposée par l'historien des sciences Dominique Pestre s'ancre dans les STS, qu'il résume en cinq points : 1) parler, plutôt que de sciences, de savoirs et de savoir-faire, de pratiques matérielles et cognitives multiples[36] ; 2) considérer les sciences non seulement comme des systèmes d'énoncés, mais aussi comme un ensemble de savoirs tacites et de savoir-faire corporels ; 3) se rappeler que les savoirs se cumulent non pas en fonction de règles logiques ou d'un éthos universellement reconnu[37], mais toujours en fonction du contexte sociohistorique des individus qui les produisent ; 4) complexifier la vision kuhnienne d'une science qui fonctionnerait selon une succession de controverses et de consensus par l'idée selon laquelle c'est la circulation d'objets et de savoir-faire qui crée des cultures communes ; 5) arrêter de voir les sciences comme des activités cognitives vouées à la simple résolution de problèmes et d'énigmes, car la pratique scientifique consiste toujours en un entrelacs de concepts, techniques et de politiques[38]. Pour les STS – malgré le nombre élevé de courants, approches et familles de pensée – nous vivons dans un monde où les séparations entre sujet et objet, entre science et société, entre vérité et idéologie, entre matière et information, entre *software* et *hardware*, entre nature et culture constituent des traits de la culture occidentale plutôt que des faits absolus. Dans cette optique, les technosciences sont vues comme des faits sociaux totaux, pour le dire avec Mauss, car elles impliquent tous les niveaux essentiels de l'agir humain : épistémique, ontologique, axiologique, politique, économique, esthétique, etc. Une manière de définir notre position est celle de la coproduction définie par la sociologue des sciences américaine Sheila Jasanoff comme suit :

> « Society cannot function without knowledge any more than knowledge can exist without appropriate social supports. Scientific knowledge, in particular, is not a transcendent mirror of reality. It both embeds and is embedded in social practices, identities, norms, conventions, discourses, instruments and institutions – in short, in all the building blocks of what we term the social »[39].

[35] Il existe des exceptions notables et nous en parlerons dans l'introduction à l'Acte 2.

[36] Tout en partageant la visée symétrisante des STS dans le choix du terme « savoir », nous n'abandonnons pas le terme de « science » et de « scientifique » dans ce travail car ce sont nos interviewés qui s'auto-qualifient comme tels.

[37] Merton, R.K., « The Normative Structure of Science », dans Merton, R.K., *The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations*, Chicago, University of Chicago Press, 1973.

[38] Pestre, D., « Pour une histoire sociale et culturelle des sciences. Nouvelles définitions, nouveaux objets, nouvelles pratiques », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 1995, n. 3, pp. 487-522.

[39] Jasanoff, S. « The idiom of co-production », dans Jasanoff, S. (ed.), *States of Knowledge. The co-production of science and social order*, London & New York, Routledge, 2004, pp. 2-3.

Le troisième pôle qui inspire notre approche est représenté par le courant pragmatique ou pragmatiste[40], en partie et d'une certaine manière relié au précédent. Le pragmatisme en sociologie se fonde sur le courant philosophique homonyme américain ; comme celui-ci, il se focalise sur les actions des individus ainsi que sur les conséquences effectives, tangibles de ces actions. Le sociologue Francis Chateauraynaud, un des représentants du courant pragmatiste en France, a défini, dans ses premiers travaux, cette approche comme suit : « La *sociologie pragmatique* […] consiste à prendre au sérieux les situations, les dispositifs et les processus dans lesquels agissent et pensent les personnes, en examinant finement leurs ressources et leurs contraintes »[41]. Une douzaine d'années plus tard, le même auteur condense le pragmatisme sociologique autour de sept maximes :

> « celle du primat de l'expérience […] [celle de] la dimension processuelle […] [celle de] la prédominance du raisonnement par les conséquences […] [celle de] la mise en discussion publique des problèmes et la formation des collectifs d'enquêteurs […] [celle de l']orientation vers l'action plutôt que vers la clôture de la représentation […] [celle du] pluralisme des modèles et des valeurs […] [et enfin celle de] la réversibilité des prises et des positions de pouvoir »[42].

Si l'approche de Chateauraynaud se déploie essentiellement dans une sociologie des controverses sociotechniques, dans laquelle il est plus pertinent de suivre les arguments pour voir quels individus ou groupes les portent ou les contestent, nous avons plutôt pris comme objet des institutions se réclamant des SSC et avons collecté les arguments de nos interviewés, en les mettant en relation avec les contraintes institutionnelles, politiques, pratiques et matérielles dans lesquels ils les ont produits[43]. La sociologie argumentative de Chateauraynaud fournit ainsi un excellent outillage pour mener l'enquête, grâce au type de questions qu'elle permet de poser et de soumettre à nos interviewés :

---

[40] « Si la pragmatique est simplement comprise comme théorie de l'action, cela n'a rien de bien pragmat-*iste*. Les écarts se font selon la place reconnue aux objets. Et selon ce critère, le pilotage d'un bateau conçu comme un travail collectif à quoi contribuent toutes sortes de rouages, des instruments et de la disposition d'une salle de contrôle à la résistance de l'eau et à la radio, bref l'idée d'esprit étendu, cela va plus loin que les grammaires de l'action et leurs objets-signaux, poteaux indicateurs de la cité pertinente » : Hennion, A., « Enquêter sur nos attachements. Comment hériter de William James ? », *SociologieS*, mis en ligne le 23.02.15, consulté le 01.08.18 : http://journals.openedition.org/sociologies/4953.

[41] Chateauraynaud, F., *Prospéro. Une technologie littéraire pour les sciences humaines*, Paris, Éditions du CNRS, 2003, p. 26.

[42] Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible. Sociologie pragmatique des transformations*, Paris, Pétra, 2017, pp. 604-606.

[43] « Argumenter, c'est mettre à l'épreuve des représentations et des connaissances partagées, ce qui signifie que tout nouvel argument doit pouvoir s'insérer dans un espace social et cognitif déjà-là, même si en se développant il peut en subvertir ou en renverser l'organisation » : Chateauraynaud, F., *Prospéro*, *op. cit.*, p. 100.

> « quelle forme d'invention argumentative engagent les acteurs lorsqu'ils cherchent à élaborer des preuves, forger des alliances, convaincre des autorités ou des publics, fonder leurs accusations et leurs critiques ? Quels régimes argumentatifs sont mobilisés et quelle est la véritable *portée* des arguments ? »[44].

Le pragmatisme s'est construit, à partir des années 1980, surtout en opposition à la sociologie dite critique de Pierre Bourdieu. Refusant la posture surplombante de dévoilement du sociologue, le courant pragmatiste se propose de « prendre les acteurs au sérieux », pour leur restituer la parole en leur reconnaissant des capacités réflexives d'habitude apanage du savant. En cela, ce courant s'inspire de l'ethnologie, comme Bruno Latour, l'un des fondateurs à la fois du pragmatisme et des STS, le dit dans cet extrait :

> « Pour donner un peu d'indépendance aux analyses de la science, il est donc nécessaire de ne pas se reposer uniquement sur ce que les savants et chercheurs disent d'eux-mêmes. Ils doivent devenir ce que l'ethnologue nomme un 'informateur', un informateur certes privilégié, mais enfin un informateur *dont on doute* »[45].

Ces trois pôles de littératures constituent la toile de fond de notre démarche théorique, mais n'épuisent pas nos sources de concepts opérationnels. Nous avons adopté, en suivant le sociologue Jean Foyer, « un certain anarchisme théorique et méthodologique […] qui autorise à un 'bricolage' scientifique »[46]. Cette attitude pluraliste et non-fidéiste permet de combiner des concepts qui proviennent de contextes théoriques lointains, voire en opposition entre eux. Elle part également du présupposé selon lequel aucune approche, aucun récit n'est jamais définitif ni le seul possible[47]. Ceci n'implique pas toutefois un chaos méthodologique, susceptible de générer des analyses incohérentes et contradictoires. L'unité de notre vision est donnée par une position épistémologique et métaphysique précise, que nous expliciterons en revenant sur l'opposition courante entre sociologie critique et sociologie pragmatique.
Si l'on accepte cette distinction en deux familles sociologiques, du moins en France, il ne faut pas tomber dans l'erreur de réduire la pluralité d'approches et de nuances à *une*

[44] Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces. Essai de balistique sociologique*, Paris, Pétra, 2011, p. 26.
[45] Latour, B., *Petites leçons de sociologie des sciences*, Paris, Seuil, 1996, p. 17.
[46] Foyer, J., « Libérer et écologiser les sciences sociales », *Hermès*, 2011, vol. 2, n. 60, p. 183.
[47] « Produire du savoir suppose des simplifications et la postulation d'ontologies spécifiques, et c'est à l'aune de l'intérêt et de la qualité des analyses produites qu'on peut juger de leur pertinence. En physique comme en sociologie, le tout n'est jamais saisi en lui-même, la science ne devient jamais un ensemble complet et ordonné, la 'réduction au niveau fondamental' reste toujours fort limitée – de fait, la science reste une somme de constructions locales plus ou moins articulées. Chacun prend les questions d'une certaine façon, à un niveau particulier d'approximation – et il cherche, à cette échelle, à faire émerger un savoir intéressant, significatif » : Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2012, vol. 6, n. 3, p. 639.

sociologie critique et à *une* sociologie pragmatiste. Toutefois, de manière schématique, en nous inspirant librement du premier article paru sur le sujet écrit par le philosophe Thomas Bénatouïl[48], nous dirons que les courants critiques se caractérisent par :

- Une approche théorique surplombante ;
- Une approche méthodologique empirique par entretien, observation et statistiques ;
- Une vision de la société déterministe ;
- Une vision de l'usage politique de la sociologie émancipateur de par la critique des rapports de domination.

D'autre part, les courants pragmatistes se caractérisent par :

- Une approche théorique symétrisante ;
- Une approche méthodologique empirique par entretien, observation et ethnographie ;
- Une vision de la société fluide et ouverte ;
- Une vision de l'usage politique de la sociologie émancipateur de par un rendu symétrique des rapports sociaux.

Si Bénatouïl exprimait une position répandue, dans les deux courants, lorsqu'il considérait ces deux approches comme difficilement conciliables, en raison de leurs différences épistémiques, axiologiques et métaphysiques, nous partageons plutôt la position de certains sociologues qui essayent de rapprocher ces deux courants[49]. En matière d'approche théorique, nous partageons les principes de symétrie de David Bloor[50] et de Latour[51], mais nous ne les appliquons pas systématiquement, car nous soulignons les asymétries lorsqu'elles nous paraissent frappantes. Nous partageons à cet égard les critiques de Pestre à propos des risques d'aplatissement épistémique et politique qu'une telle approche, si appliquée invariablement, peut produire :

> « Mon sentiment est que le monde créé par ces notions [de symétrie] et leur répétition tend aujourd'hui à faire oublier *les limites de l'agency* dont disposent certains acteurs, et surtout à ne pas considérer cette question comme un problème important justifiant qu'on l'investisse. Mon sentiment est que le monde créé par ces notions et leur répétition contribue à rendre invisibles *les contraintes lourdes* qui pèsent sur certaines populations, le fait que leur promotion unilatérale a une

[48] Bénatouïl, T., « Critique et pragmatique en sociologie. Quelques principes de lecture », *Annales*, 1999, vol. 54, n. 2, pp. 281-317.

[49] De 2015 à 2017, nous avons organisé à l'EHESS, avec les autres doctorants du GSPR, Nassima Abdelghafour, Martin Denoun, Adhémar Saunier et Jean Francès, un séminaire de recherche intitulé « Quels horizons critiques pour le pragmatisme en sociologie ? ». Nous y avons invité plusieurs chercheurs et chercheuses provenant d'écoles différentes, dans le but « d'identifier […] les passerelles possibles entre sociologie critique et sociologie pragmatique, en vue de mieux repérer comment l'une *avec* l'autre peuvent porter de manière convaincante une critique sociale renouvelée » : https://enseignements-2016.ehess.fr/2016/ue/1719/. Le point de vue décrit ici n'engage que nous.

[50] Bloor, D., *Knowledge and social imagery*, Londres, Routledge, 1976.

[51] Latour, B., *La science en action. Introduction à la sociologie des sciences*, Paris, La Découverte, 1989.

politique […] Mon sentiment est qu'il *euphémise* la violence du monde et la variété des situations, qu'il les rend peu visibles et écrête la complexité toujours-déjà structurée du monde »[52].

Le principe de symétrie ou la posture critique sont pour nous deux attitudes à adopter selon les contextes : la première lorsqu'on souhaite comprendre des reconfigurations du monde, des conflits entre plusieurs points de vue, la deuxième lorsqu'il faut rendre compte de l'exercice d'un quelconque pouvoir de plus en plus dominant. En même temps, s'il est vrai, comme le dit Chateauraynaud, que « [d]ans la sociologie pragmatique, les acteurs sont crédités d'une forte compétence sociale »[53], cela ne nous empêche pas d'avoir, en tant que sociologues, quelque chose à dire sur la réalité sociale. Nous ne croyons pas que les sociologues doivent se limiter à reporter les critiques des groupes sociaux étudiés, en se dispensant d'offrir leur point de vue critique, ni nous ne pensons que les théories sociologiques n'ajoutent rien à la vision des individus pris en objet[54]. Avec les sociologues Sébastien Chauvin et Nicolas Jounin, nous pensons que l'enquêteur apporte à ses enquêtés un point de vue théorique et une variation de points de vue :

« On pourrait donc se demander […] quelle est la spécificité […] de l'observateur quand il s'avère que les 'observés' lui fournissent ses analyses […] Ce n'est pas seulement que l'enquêteur est armé de théories sociologiques et sait mettre ses propres résultats en perspective avec ceux d'études précédentes. C'est aussi qu'il ne sollicite pas une seule analyse d'un seul acteur, mais cherche à faire ce que les enquêtés, pris dans les barrières et les exigences du quotidien, peuvent rarement se permettre : varier les points de vue »[55].

Chauvin et Jounin citent le sociologue de l'École de Chicago Everett Hughes, qui résumait cette idée ainsi : « Il n'y a rien que je sache qu'au moins un des membres de ce groupe ne sache également, mais, comme je sais ce qu'ils savent tous, j'en sais plus que n'importe lequel d'entre eux »[56].
Si on a décrit l'approche empirique de la thèse, sur laquelle nous ne reviendrons pas, il reste à discuter la vision du monde social et la vision de l'usage politique de la sociologie qui sous-tendent les analyses qui suivent. Quant à la première, notre vision combine déterminisme social et ouverture des futurs, car les individus nous semblent être dotés d'un libre arbitre *limité* par les contraintes du monde. Quant à la deuxième, il apparaît qu'à tour de rôle, les sociologies critiques et les sociologies pragmatistes

[52] Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *op. cit.*
[53] Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces*, *op. cit.*, p. 20.
[54] Boltanski, L., « Sociologie critique et sociologie de la critique », *Politix*, 1990, vol. 3, n. 10-11, p. 134.
[55] Chauvin, S. & Jounin, N., « L'observation directe », dans Paugam, S., *L'enquête sociologique*, Paris, PUF, 2010, pp. 164-165.
[56] Cité par Becker, H.S., *Les ficelles du métier*, Paris, La Découverte, 2002, p. 166.

visent un effet émancipateur pour les groupes sociaux qu'elles étudient (et pas seulement pour eux). Les deux approches, par contre, peuvent aussi devenir contre-productives, lorsqu'elles poussent à l'extrême leurs propensions, la critique pouvant amener à une fermeture des futurs qui dépossède les individus de leur libre arbitre et le pragmatisme invitant à penser que le monde est tellement plat et fluide que tout est possible pour tous à tout moment. En définitive, que cela soit à partir d'une tradition critique ou à partir d'une tradition pragmatiste, une vision du monde qui combine les deux courants et qui soit à la fois changeante et inertielle, qui intègre à la fois « l'interprétation charitable »[57] et la posture critique, est selon nous possible.

Plan de la thèse[58]

Le prologue[59] se propose de répondre à la question suivante : de quoi parle-t-on, lorsqu'on parle de complexité ? Si le reste de la thèse porte sur les SSC, ce premier chapitre aborde le problème des différents usages du terme de « complexité » dans des contextes disciplinaires hétérogènes et par des groupes sociaux distincts. En employant le concept de *tradition*, nous proposons un tableau composé de sept groupes, identifiés en raison de plusieurs éléments, dont les références qu'ils mobilisent, la définition de complexité qui les rassemble et les espaces où ils se rencontrent. Nous verrons alors que les sciences de la complexité ne représentent qu'une de ces sept *traditions*. Si nous avons choisi d'étudier celle-ci, et pas les autres, c'est parce qu'il s'agit de la plus connue et institutionnellement ancrée : dans la vaste majorité des cas listés au début de cette Introduction générale, c'est au sens des SSC que le terme de complexité est utilisé.

L'Acte 1[60] aborde la première problématique, celle concernant le rôle de l'ordinateur dans le travail scientifique interdisciplinaire. Après une introduction qui approfondira ce questionnement, six chapitres composent cet Acte. Le premier aborde le projet épistémique des SSC : on y verra que, si la visée interdisciplinaire des fondateurs de ce domaine est claire et présente dès le début, y compris et surtout en direction des SHS, elle s'ancre autour de trois disciplines qui sont la source à la fois des méthodes d'analyse et des visions onto-épistémologiques des sciences de la complexité. La physique, l'informatique et les mathématiques sont ainsi investies d'une mission bien identifiée : celle de rendre plus scientifiques, par le biais de la quantification et de la formalisation mathématique et computationnelle, toutes les autres sciences naturelles et sociales.

---

[57] Shapin, S. & Schaffer, S., *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, Princeton, Princeton University Press, 1985, p. 13.

[58] Les différentes parties de cette thèse, exception faite pour les introductions et les chapitres, sont nommées en s'inspirant du lexique théâtral, afin de rendre plus clair le rapport de chaque section à la problématique générale.

[59] Si dans le lexique théâtral le prologue désigne la première partie d'une œuvre, faisant office de préambule afin de présenter les personnages et le contexte de la pièce, ici ce terme est particulièrement approprié car le premier chapitre de la thèse vise à donner un panorama des différents groupes sociaux mobilisant le terme de complexité de manière systématique pour nommer leurs recherches.

[60] Acte est le nom qu'on donne aux parties principales qui composent une pièce de théâtre ou d'une opéra.

Après ce premier panorama, dressé à partir des archives et des extraits d'entretien des fondateurs du SFI et de l'ISC-PIF, nous relaterons l'histoire de la fondation de l'institut américain. Nous y décrirons la manière dont la « science de la complexité », pour citer la formule employée au début par ceux qui l'ont lancée, est venue se constituer comme une science computationnelle. Si l'ordinateur avait été identifié par les fondateurs du SFI comme un instrument central pour les recherches scientifiques qu'ils voulaient mettre en place, la construction de laboratoires de chimie ou de biologie avait été également envisagée. Or, les archives fournissent un élément qui met à mal des récits fondés sur le déterminisme technique, car ce projet de laboratoires de sciences naturelles a été abandonné pour une raison contingente, le voisinage de l'institut ne voulant pas de laboratoires potentiellement dangereux pour leur vie quotidienne. Tous les instituts de la complexité inspirés du SFI seront, à partir de là, uniquement dotés d'ordinateurs.

Suite à ce premier chapitre historique, nous avons consacré un aparté[61] à la manière dont le SFI s'inscrit dans le contexte socio-économique américain depuis sa fondation à aujourd'hui. Il s'agira de voir quelles typologies de collecte de fonds, de gestion de l'institution et de discours idéologiques l'institut américain a mis en place au cours des années. Cela sera l'occasion pour nous de proposer une hypothèse interprétative des raisons qui ont mené les fondateurs du SFI à lancer un nouveau domaine technoscientifique : face à une configuration inédite du capitalisme contemporain sous la présidence de Ronald Reagan, les physiciens, économistes, biologistes et informaticiens qui ont animé l'institut au début de son existence ont vu dans les nouveaux outils computationnels une manière plus efficace de gérer les problèmes du monde et de générer des profits.

Les trois chapitres suivants examinent la situation française. D'abord, il s'agira de raconter l'histoire de la création puis de la fermeture du Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) de l'École Polytechnique, première institution française où il est question, dès les années 1980, de complexité et de sciences cognitives. Ce laboratoire s'est posé l'objectif de mener des études explicitement interdisciplinaires, couplant les SHS aux sciences naturelles de manières inusitées jusqu'alors en France. Fondé en 1982, le CREA fermera en 2012 du fait d'une série de conflits à la fois épistémiques, idéologiques et institutionnels, qui ont vu s'opposer des chercheurs favorables à une naturalisation des SHS et enclins à une science sur projet à des chercheurs conduisant un travail interdisciplinaire anti-naturalisant et menant un travail scientifique à petite échelle et artisanal.

L'histoire du CREA, intéressante en soi et pour mettre en lumière les tensions qui existent entre SSC et SHS, entre quantitatif et qualitatif, entre numérique et

[61] Un aparté est une réplique de théâtre prononcée par un personnage qui ne s'adresse qu'au public et que les autres personnages n'entendent pas. Cette rupture du quatrième mur sert à mettre au jour le ressenti et les pensées personnelles d'un personnage. Nous l'employons métaphoriquement pour les chapitres qui ne répondent pas à la problématique de l'Acte dans lequel ils sont contenus.

sémiotique, est en revanche indispensable afin de comprendre la fondation en France du domaine lancé par le SFI. C'est en s'appuyant sur l'institution de l'École Polytechnique que les entrepreneurs scientifiques français ont réussi à fonder l'ISC-PIF en tant que partie du Réseau National des Systèmes Complexes, organisme financé par le CNRS. Nous verrons que cet institut aura non seulement survécu au CREA mais aussi contribué à en produire la disparition. À l'aune du modèle représenté par le SFI, l'institut francilien de la complexité contient uniquement des ordinateurs et son corps de chercheurs se compose principalement d'informaticiens et de physiciens. Plus encore que son homologue américain, l'ISC-PIF s'est penché sur les SHS pour une raison, là aussi, contingente. L'Institut des Sciences Humaines et Sociales (InSHS) du CNRS a en effet décidé de stabiliser cette institution en la transformant en une Unité Propre de Service pour sa contribution au développement des dites « humanités numériques ».

L'Acte 1 se conclut avec un deuxième aparté dédié, de façon spéculaire vis-à-vis du premier, à la manière dont l'institut francilien de la complexité s'inscrit dans le contexte socio-économique français. Tandis que le SFI relève de la nouvelle vague de capitalisme initiée dans les années 1980, les informaticiens et polytechniciens de l'ISC-PIF militent pour des plateformes numériques *open source*.

Entre le premier et le deuxième Acte, un intermède[62] s'occupera de deux questions souvent abordées par la littérature sur les sciences et les savoirs, questions auxquelles les SSC peuvent permettre de contribuer de manière originale. Il s'agit d'une part de l'étude des domaines émergents, d'autre part de la question de ce que nous appellerons l'*ingénierie de l'interdisciplinarité*. Nous proposerons de saisir le statut socio-épistémique particulier des SSC à partir du concept de *plateforme méta-disciplinaire*. Ceci nous permettra de rendre compte de la nature lâche de ce domaine interdisciplinaire, que plusieurs scientifiques de disciplines différentes utilisent soit pour relancer leurs spécialités, soit pour en fonder des nouvelles. En ce qui concerne les pratiques de l'interdisciplinarité, un chapitre fournira une classification idéal-typique[63] des formes du travail scientifique interdisciplinaire que nous avons observées

[62] Dans le théâtre, l'intermède désigne une danse ou un chœur de musique visant à entretenir les spectateurs entre un acte et l'autre. Il aura ici la même fonction que l'aparté, désignant donc une partie composée de chapitres dédiés à des problématiques autres que celle contenue dans le titre de cette thèse.

[63] Max Weber a défini l'idéaltype ainsi : « On obtient un idéal-type en accentuant unilatéralement un ou plusieurs points de vue et en enchaînant une multitude de phénomènes isolés, diffus et discrets, que l'on trouve tantôt en grand nombre, tantôt en petit nombre, par endroits pas du tout, qu'on ordonne selon les précédents points de vue choisis unilatéralement pour former un tableau de pensée homogène » : Weber, M., *Essais sur la théorie de la science*, Paris, Plon, 1965, p. 141. Il s'agit donc d'une catégorie abstraite regroupant les traits saillants d'un groupe hétérogène de personnes, qui partagent un certain nombre de caractéristiques essentielles. Les individus pouvant être décrits par un idéaltype peuvent ne pas inclure toutes les caractéristiques listées dans la stylisation effectuée par le sociologue, ou en tout cas pas toutes dans le même degré. Ce sont les régularités observées sur le terrain qui nous ont permis de concevoir des types sociaux, ceux-ci étant très utiles à rendre compte de phénomènes plus généraux. Nos typologies ne se veulent pas définitives et closes, mais comme des moyens conceptuels pour les comparer à la réalité. Elles sont toujours un moyen analytique pour une fin de compréhension autre que la catégorisation elle-même. En ceci, nos idéaux-types, même lorsqu'ils typifient des ontologies, se distinguent de la démarche que Philippe Descola a suivi, dans son *Par-delà nature et culture*, pour

sur le terrain des SSC, tandis qu'un autre chapitre abordera l'usage intentionnel et effectif que les scientifiques font de l'architecture des instituts de la complexité pour encourager les collaborations entre chercheurs et chercheuses porteurs de savoirs différents.

L'Acte 2 interroge le plaidoyer pour une nouvelle épistémologie que nombreux philosophes des sciences tiennent face à la nouveauté des savoirs produits par l'usage de l'ordinateur. Après une introduction qui approfondit les arguments présents dans la littérature sur ce sujet et après un glossaire qui présente les termes d'usage courant dans les pratiques de modélisation et de simulation numériques, un premier chapitre décrira les principaux régimes de l'administration de la preuve que nous avons observés à l'œuvre dans les SSC. Ces régimes ne sont pas nouveaux, pouvant être repérés dans des disciplines vieilles et récentes, telles que la biologie, les statistiques et l'informatique. Le deuxième chapitre aborde ensuite une question souvent oubliée par la littérature sur les sciences computationnelles : celle des données. Point aveugle de la réflexion sur les pratiques de la modélisation numérique, la phase de collecte et de (re)construction des données représente cependant la plus importante du travail des scientifiques computationnels : nous lui dédions le deuxième chapitre. Le troisième déplace, quant à lui, l'attention des questions épistémologiques aux questions ontologiques et constitue, à nos yeux, le cœur de ce deuxième Acte. Plus en détail, il offre un tableau idéal-typique constitué de cinq profils sur un continuum allant de la position la plus *dualiste* – séparant le monde des systèmes réels du monde des systèmes simulés – à la position la plus *moniste* – voyant l'univers comme le produit d'une série d'algorithmes, l'information étant une force physique au même titre, sinon plus important, que la matière et l'énergie. Conclut cette deuxième partie un chapitre critique, dans lequel nous soulignerons, d'un point de vue philosophico-politique, les problèmes et les dangers reliés à la métaphysique computationnelle des sciences et des cultures numériques.

L'Acte 3, composé d'un seul chapitre, aborde la question du lien entre le processus de la digitalisation des sciences et celui de la néolibéralisation du monde[64]. La caractéristique du capitalisme contemporain étant l'abattement de toute frontière pour

---

construire ses quatre cosmologies – totémisme, analogisme, animisme et naturalisme. Ces dernières visent à rendre compte des différentes manières qu'ont les cultures humaines de concevoir le rapport entre nature et culture (Descola, P., *Par-delà nature et culture*, Paris, Gallimard, 2005). Se réclamant également de l'idéaltype wébérien, Descola a toutefois construit sa grille ontologique quadripartite et symétrique de manière à inclure toutes les variantes possibles des visions que les cultures ont du rapport entre intériorité et physicalité. S'il est vrai que pour Weber l'idéaltype n'est pas construit par généralisation inductive, il est vrai aussi que ce procédé sert à saisir l'individuel sans le dissoudre dans le générique (Grossein, J.-P., « Leçon de méthode wébérienne », dans Weber, M., *Concepts fondamentaux de sociologie*, Paris, Gallimard, 2016, p. 55). Or, il se trouve que les « schèmes d'intégration de l'expérience » (Descola, P., *Par-delà nature et culture*, *op. cit.*, p. 404) proposés par Descola finissent, à notre avis, par faire exactement cela, se voulant en outre une liste close et définitive.

[64] À la différence des deux premiers, ce troisième et dernier Acte, étant composé d'un seul chapitre, ne contiendra pas une introduction générale.

créer un « espace des flux »[65], d'après nombreux auteurs les technologies digitales ne feraient qu'accompagner ce processus de globalisation des flux financiers, de marchandise et de ressources humaines. À partir des engagements des spécialistes des systèmes complexes, issus notamment de la géographie quantitative et de l'épidémiologie computationnelle, nous montrerons comment l'utilisation des technosciences digitales ne conduit pas systématiquement à une vision néolibérale du monde et de la société.
L'épilogue reviendra sur les acquis des différents chapitres de la thèse, pour en mettre en lumière les limites et pour signaler des possibles pistes de recherche pour le futur.

Notes terminologiques

Convaincu que le langage est un vecteur de postures et de comportements de nature sociopolitique, nous avons pris soin d'employer ou d'éviter un certain nombre de termes.
En premier lieu, nous employons dans cette thèse une écriture inclusive peu invasive, afin de ne jamais invisibiliser les femmes – certes peu présentes dans un domaine très informatisé comme celui des SSC – et à la fois pour éviter la lourdeur visuelle des techniques d'écriture utilisées pour la mettre en place.
En deuxième lieu, nous n'utiliserons le terme de « réseau » qu'entre guillemets, en l'attribuant soit aux scientifiques que nous avons étudiés, soit aux sociologues qui l'emploient. Nous ne trouvons pas seulement qu'il s'agit d'un terme utilisé abusivement en SHS, nous le mettons à distance aussi pour deux autres raisons. D'une part, il s'agit d'un terme propre aux SSC, qui ont contribué à le diffuser dans les autres domaines du savoir et dans le langage parlé. En outre, les influences réciproques entre sciences, sous forme de métaphores et d'emprunts, sont normalement vues comme enrichissantes, mais à notre avis ces courts-circuits sont parfois plus appauvrissants et confondants qu'autre chose. Il nous paraît ensuite plus éclairant de distinguer entre le langage indigène et le langage analytique sociologique, pour ne pas mélanger les niveaux et ne pas faire des mises en abyme confondantes. D'autre part, « réseau » est un terme porteur d'une métaphysique du monde et d'une vision politique que nous critiquons dans le chapitre 14 de cette thèse. En particulier, la métaphore du réseau fluidifie et informatise la nature et la société, en oubliant les aspects matériels, pratiques et culturels, qui sont soumis à des inerties et à des frictions que la vision numérique tend à oublier et à faire oublier.

[65] « Je pense, écrit plus en détail Castells, qu'il existe une forme spatiale nouvelle caractéristique des pratiques sociales qui dominent et façonnent la société en réseau : l'espace des flux. *L'espace des flux est l'organisation matérielle des pratiques sociales du temps partagé qui s'effectuent au travers de flux*. Par 'flux', j'entends des séries significatives, répétitives et programmables d'échanges et d'interactions entre des positions géographiquement éloignées occupées par des acteurs sociaux dans les structures économiques, politiques et symboliques de la société » : Castells, M., *La société en réseau. L'ère de l'information*, Paris, Fayard, 1998, p. 463.

En troisième lieu, nous rappelons que « virtuel » est un faux synonyme de « numérique » ou de « digital » : le virtuel, chez Aristote, est ce qui est en puissance, ce qui pourrait être, ce qui sera. En revanche le digital n'a pas vocation à devenir quelque chose d'autre de ce qu'il est. Nous faisons cette distinction soigneusement dans cette thèse, tandis que nos interviewés ne la font pas toujours.
En quatrième et dernier lieu, nous avons fait l'effort de ne pas employer le terme d'« acteur », pourtant presque universel en sociologie. Là aussi, ce n'est pas seulement en raison de son inflation, qui aplatit la variété des formes d'« acteurs » que ce terme recouvre et homogénéise, mais aussi parce que nous partageons les critiques que Dominique Pestre a adressé à ce terme, en invitant à penser à des alternatives :

> « 'Acteur' est aujourd'hui un terme omniprésent dont l'usage paraît naturel et évident car neutre, général et abstrait, non problématique car sans signification propre. En réalité, dès qu'on y regarde, il apparaît à la fois comme limitatif et hautement polysémique. Il renvoie pour certains (n'est-ce pas le sens initial du mot acteur ?) à un monde dans lequel chacun joue (ou est tenu de jouer) un rôle, un monde où l'individu se met constamment en scène – une situation au centre des *reality shows* qui peuplent nos télévisions par exemple. Il renvoie, second sens possible, à un monde conçu comme constitué d'individualités agissantes et libres, pleinement 'responsables' et en charge de leur vie, la construisant en toute autonomie et fécondité – comme le veut le discours (néo-)libéral qui, aujourd'hui, emplit les magazines. Symétriquement, on peut l'imaginer comme l''acteur rationnel' pratiquant de façon continue des évaluations coûts-bénéfices, optimisant ses intérêts, mesurant les options qui sont les siennes – ce qui est la version de maints économistes (mais pas seulement) lorsqu'ils modélisent nos comportements. Ou comme un acteur stratégique dans un monde essentiellement agonistique où chacun tend à faire passer l'autre sous ses fourches caudines – ce qui forme la version initiale de la théorie de l'acteur-réseau. […] il est peu surprenant que le monde apparaisse alors comme à la fois isotrope (il n'est constitué que d'entités distribuées et suivant la même logique) et ouvert à toute recomposition (puisque rien ne tient ce monde par-delà les actes à venir des 'acteurs'). Mais il se pourrait que cette description soit bien trop fruste, bien trop simple – et dangereuse par l'homogénéisation et les aveuglements qu'elle crée. […] Il importe donc de sortir de la monade 'acteur', de penser au-delà d'elle, de concevoir des 'types d'acteurs' plus différenciés »[66].

Il sera ainsi pour nous question de « scientifiques », de « chercheurs » et de « chercheuses », d'« interviewés », de « groupes sociaux », de « traditions »,

[66] Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *op. cit.*, pp. 643-644.

d'« institutions », etc. L'exercice de remplacement n'a pas été facile, mais pour cela même le défi valait la peine d'être relevé.

Nota bene : les citations des extraits du matériau seront en français lorsque les propos ont été recueillis dans cette langue ou en espagnol et en italien. Le matériau en anglais sera cité en langue originale dans les citations mises en évidence, tandis qu'il sera traduit en français par nos soins lorsqu'il sera cité dans le corps du texte, pour ne pas interrompre le flux de la lecture dans la langue principale de ce document.

Prologue – Chapitre 1 – Les théories de la complexité : un essai de mise en ordre[67]

Introduction

Ce Prologue essaie de répondre à la question suivante : qu'est-ce qu'on entend sous la notion de « complexité » ? Chaque observateur ou usager du concept répondra en nommant un chercheur ou une chercheuse, un courant, ou bien une institution de recherche qui, plus que les autres, incarne les recherches sur la complexité : on pourra entendre les noms de Niklas Luhmann, d'Edgar Morin, du Santa Fe Institute, d'Albert-László Barabási, d'Herbert Simon, d'Ilya Prigogine, de Stephen Wolfram, de Peter Suedfeld, des « interventions complexes » en médecine, de l'« ingénierie des systèmes », de la « recherche opérationnelle », de l'« analyse des systèmes ». Qui en est le « vrai » représentant ? La réponse est à double face. Tous, car les courants cités, et bien d'autres, auto-déclarent leur appartenance à un mouvement développant une « théorie de la complexité ». En même temps, nul ne saurait réduire ce champ à un seul nom ou à un seul sigle. Les notions, les groupes, les institutions, les disciplines, les enjeux épistémiques, ontologiques et politiques de ceux et celles qui emploient le concept de complexité afin de fédérer un domaine de recherche, une approche ou un ensemble de disciplines, varient à tel point que parler d'*un* domaine des théories de la complexité n'a guère de sens[68].

Ce premier chapitre vise à trancher une autre question. Le reste de la thèse est consacré à l'une des théories de la complexité, à savoir celle qui se déploie sous le nom de sciences de la complexité ou des systèmes complexes. Il se trouve que nombre d'historiens et de philosophes des sciences, ainsi que des scientifiques, considèrent que le domaine des SSC trouve son origine directe dans un ensemble de techno-savoirs apparus pendant et après la Seconde Guerre mondiale, notamment dans la recherche

[67] Ce chapitre s'appuie sur le travail exploratoire suivant : Li Vigni, F., *Les Théories de la complexité (1970-2010). Une sociohistoire d'un domaine émergent*, mémoire de master en sociologie générale, EHESS, soutenu en juin 2014. Il a été publié en forme extrêmement compacte sur un carnet de recherche de sociologie : Li Vigni, F., « Les théories de la complexité : des points de repère », *Socio-informatique et argumentation*, 23/03/2015 : http://socioargu.hypotheses.org/5004 ; une version plus longue, enrichie d'une partie ici supprimée, mais toujours intermédiaire, a été publiée sous forme de chapitre d'ouvrage collectif : Li Vigni, F., « La place du désordre dans les différentes traditions des théories de la complexité », dans Lévy, J.-C. (ed.), *Complexité et désordre*, Éditions matériologiques, Paris, 2018 (ce chapitre est issu de la présentation homonyme fait aux « Journées Complexité et Désordre. Adaptation localisation dynamique », Paris Diderot-Institut Henri Poincaré, 28-29/01/2016).

[68] Si nous avons choisi la formule de « théories de la complexité », c'est parce qu'elle nous paraît suffisamment générique pour inclure des figures très différentes. Par « théorie », on se réfère autant à une doctrine philosophique qu'à une méthode d'intervention et à une science. Tandis que « complexité » renvoie tantôt aux discours philosophiques sur le concept en général, tantôt aux études scientifiques sur les systèmes complexes ou à d'autres emplois systématiques de l'adjectif « complexe ».

opérationnelle, la théorie des jeux et la cybernétique[69]. En réalité, comme nous le montrerons plus loin, le domaine des sciences de la complexité trouve ses origines directes dans les mathématiques des systèmes dynamiques et dans la théorie du chaos.
Il existe une littérature importante, surtout de vulgarisation, sur plusieurs théories de la complexité. Nous n'en ferons pas une revue détaillée, mais nous proposerons une typologie des lectures qui sont données de ce vaste champ. Il existe des lectures unificatrices et iréniques de domaines émiettés et hétérogènes, comme il existe des lectures qui réduisent les emplois du concept de complexité à un seul courant, en effaçant les mouvements concurrents ou simplement homonymes. Toutes les tentatives de mise en ordre, y compris la nôtre, se confrontent à la difficulté de surmonter la masse de chercheurs et de chercheuses, d'espaces, d'approches et de revendications différents. Partant, l'objectif que nous nous fixons est d'offrir un certain nombre de points de repères pour s'y orienter.
Une difficulté supplémentaire est donnée par le fait que le concept de complexité est d'usage commun. Dans les théories traitées ici, il devient un mot d'ordre, ou un mot valise, capable de créer une identité nouvelle pour une méthode, un objet de recherche ou une discipline qui sont inédits. Le premier effet de notre cartographie sera celui de déconstruire l'image d'une unité qui n'existe pas, à l'aide des matériaux bibliographiques et sociohistoriques dont nous disposons. Un autre enjeu de notre enquête est d'éviter de fixer les titres de légitimité à parler de complexité : en « suivant les acteurs » et en les traitant symétriquement[70], nous les considérons comme légitimes dès lors qu'ils ou elles se sont auto-définis et comportés comme tels. Un troisième effet consiste à dissiper un certain nombre de confusions, comme celle qui tend à assimiler l'analyse de systèmes née pendant la Seconde Guerre mondiale aux SSC, domaine en réalité lancé par le Santa Fe Institute au milieu des années 1980 (voir encadré 1).

Critères pour définir le périmètre de l'enquête

Un certain nombre de critères nous ont guidé pour établir le périmètre des courants à prendre en compte dans notre travail. Afin d'en dresser une liste la plus possible exhaustive, nous avons repéré et choisi de parler seulement des personnes qui utilisent le mot « complexité » pour désigner et se réclamer d'une communauté technoscientifique particulière. Chacune de ces communautés avance, en général, des revendications épistémologiques, paradigmatiques, techniques, institutionnelles,

[69] Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2000, vol. 31, n. 4, pp. 583-609 ; Fox–Keller, E., « Organisms, Machines, and Thunderstorms : A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors », *Historical Studies in the Natural Sciences*, 2009, vol. 39, n. 1, pp. 1-31 ; Grauwin, S., Beslon, G., Fleury, E., Franceschelli, S., Robardet, C., Rouquier, J. and Jensen, P., « Complex Systems Science : Dreams of Universality, Reality of Interdisciplinarity », *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2012, vol. 63, n. 7, pp. 1327–1338.
[70] Latour, B., *La science en action*, *op. cit.*

métaphysiques et politiques en rupture avec les champs disciplinaires où elles s'inscrivent. Qu'est-ce qui rassemble ces groupes et permet de les traiter dans un seul mouvement d'enquête, au vu de leurs énormes différences ? La seule raison est la coïncidence du mot employé par ces communautés hétérogènes pour se fédérer autour d'un objet, d'une approche ou d'un domaine de recherche. Néanmoins ces groupes se connaissent parfois, dressent des distinctions entre eux, collaborent ou engagent des controverses. Des interconnexions et des références croisées peuvent également être observées. Il arrive en outre que les discours tenus par les différentes théories de la complexité présentent des traits communs[71].

Même si rien ne justifie de les traiter comme une seule entité socio-épistémique, l'on peut essayer, comme nous l'avons fait dans des écrits précédents, quelques exercices définitionnels, capables de faire remonter les traits communs de ces théories dans une courte énonciation : les théories de la complexité peuvent être définies comme un ensemble très varié de connaissances et de techniques qui, avec des outils, des cadres épistémologiques, des langages, des espaces et des dispositifs qui diffèrent, se proposent d'aborder les problématiques de l'hétérogénéité des structures et des interactions des systèmes, de l'irréductibilité, de l'imprédictibilité et de l'aléatoire. À la lumière de la nature disparate et décousue des groupes concernés[72], une telle définition commune, tout en ayant le mérite de donner un premier point de repère à un observateur novice, risque de produire un effort vain et par trop artificiel. Il est par contre plus utile de rappeler l'étymologie latine du mot « complexe ». Si un point réellement commun entre toutes les théories de la complexité existe, c'est bien la référence explicite et consciente au concept dans son acception latine originaire. Si dans le langage commun « complexe » s'est banalisé, en devenant synonyme de « difficile », « obscur », « intriqué », l'étymologie indique deux caractéristiques bien précises : la première est l'interdépendance entre les composants d'un ensemble dit complexe, tandis que la seconde est l'irréductibilité de cet ensemble à ses parties. *Cum* et *plexus* signifient respectivement « avec » et « tissé » : est complexe tout ce qui est tissé ensemble et qui ne peut pas être décomposé sans être dénaturé[73].

---

[71] Trois exemples : Herbert Simon parle de l'architecture de la complexité pour décrire les différentes couches qui composent un système artificiel ou naturel ; le Santa Fe Institute a tâché de définir les principes et les règles basilaires communes du fonctionnement de tout système complexe, naturel ou social ; Edgar Morin cherche un méta-paradigme pour aborder la complexité de tout système complexe, qu'il soit naturel ou social.

[72] Tout au long de ce texte, « groupe » sera un synonyme plus général de « tradition ». Il sera interchangeable avec ce dernier terme plus précis comme souvent le sont respectivement « animal » et « chien » dans un récit lorsqu'il n'y a pas d'ambigüité possible.

[73] L'emploi abondant de ce terme dans le sens originaire n'est pas nouveau. Claude Bernard, dans son *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, emploie l'attribut « complexe » ou le nom « complexité » quatre-vingt-seize fois. Henri Poincaré, dans ses études sur les trois corps, définit leurs trajectoires comme complexes. Ludwig von Bertalanffy, dans sa *systémique*, ainsi que les cybernéticiens des Macy Conférences de New York, disent avoir à faire avec des systèmes complexes. Pourtant, aucun de ces auteurs ou groupes n'a érigé le concept de complexité à étendard d'un nouveau champ ou d'une nouvelle méthode. Par ailleurs, nous ne nous sommes pas donné, ici, la tâche anachronique de trouver des précurseurs, ni celle épistémologique et potentiellement infinie de repérer toutes les formes de complexité dans le champ des savoirs.

Matériaux et structure du chapitre

À partir d'une analyse bibliographique, de la réalisation d'un certain nombre d'entretiens[74] et de l'apport fourni par un outil de scientométrie[75] (CorTexT[76]), nous avons repéré sept groupes, que nous proposons d'aborder sous le concept de *tradition*, terme qui permet d'indiquer la continuité socio-épistémique dans le changement. Pour chacune des *traditions* des théories de la complexité, nous proposons d'identifier : les représentants principaux ; leurs espaces de rencontre, de construction et de diffusion de leurs savoirs et savoir-faire ; l'ensemble des références qui fait leur bagage commun ; les outils conceptuels et techniques qu'ils partagent ; la définition de la complexité qui les rassemble ; ainsi que les projets et les promesses épistémiques et/ou politiques qu'ils mettent en avant. Nous n'entrerons pas dans l'évaluation de la portée des luttes intellectuelles et sociales qui les traversent, comme nous ne ferons pas mention des processus qui ont amené à leur solidification ou à leur disparition.

Sept sections composent ce Prologue : la présente introduction ; une section qui classe en cinq typologies la littérature existante sur les théories de la complexité pour en souligner les limites ; une section sur le concept de *tradition*, dans laquelle nous explicitons notre approche sociohistorique ; une section sur les *traditions* des théories de la complexité, qui contient sept sous-sections dédiées à chacune d'entre elles ; une section sur les individus à cheval entre plusieurs *traditions* ; une section sur les électrons libres qui, tout en employant de manière systématique le concept de complexité, ne le font pas dans le contexte d'un groupe mais individuellement ; une section sur d'autres notions de complexité qui circulent, sans pour autant former des *traditions* au sens que nous lui donnons ; une conclusion qui revient sur le choix du concept de *tradition* au détriment d'autres disponibles.

Encadré 1. Analyse des systèmes et recherche opérationnelle : des théories de la complexité ?

Issues de la systémique, de la cybernétique et des mathématiques appliquées, et parfois considérées comme synonymes[77], l'analyse des systèmes[78] et la recherche opérationnelle[79] pourraient être rangées dans les théories de la complexité, car, comme le montrent des travaux historiques, elles travaillent sur, et s'appliquent à des « problèmes complexes »[80]. Développées pendant la Seconde Guerre mondiale et la Guerre froide par l'armée anglaise, puis l'armée américaine, le MIT (Jay Forrester, Norbert Wiener, Herbert Simon, etc.), la *Rand*

[74] Pour autant que possible, nous avons suivi les groupes dans leur définition réciproque, par oppositions et recoupements, par contrôles croisés et répétés.

[75] Notre philosophie dans l'emploi de cet outil rappelle celle décrite par Francis Chateauraynaud par rapport au logiciel Prospéro qu'il a co-développé avec l'informaticien Jean-Pierre Charriau : ce qui compte c'est le gain en intelligibilité qu'un outil socio-numérique peut apporter, non pas la production d'images ou de données prêt-à-porter qu'il peut fournir : Chateauraynaud, F., *Les sombres précurseurs. Une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, Paris, Éditions de l'EHESS, 1999, 2013, p. 450.

[76] Le site officiel de CorTexT : http://www.cortext.net.

[77] Quade, E.S. & Boucher, W.I. (ed.), *Systems Analysis and Policy Planning*, New York, American Elsevier, 1968, p. 3.

[78] Hoos, I.R., *Systems Analysis in Public Policy. A Critique*, Berkeley, University of California Press, 1972.

[79] Cohen, V., *La recherche opérationnelle*, Paris, PUF, 1995.

[80] Dahan, A. & Pestre, D. (ed.), *Les sciences pour la guerre*, *op. cit.* ; Pestre, D. (ed.), *Le gouvernement des technosciences*, *op. cit.*

Corporation et par d'autres institutions publiques et privées américaines et anglaises, elles n'emploient les concepts de système complexe ou de complexité qu'occasionnellement, sans les thématiser et sans les utiliser comme des concepts-drapeau fédérateurs. Quand elles les utilisent, elles se réfèrent à des ensembles hétérogènes homme-machine et à la difficulté de les traiter efficacement avec les outils mathématiques traditionnels. La recherche opérationnelle (*operations research* aux USA et *operational research* au Royaume Uni) et l'analyse des systèmes pourraient être définies comme des ensembles de méthodes ou d'outils hétérogènes finalisés à la résolution de tas de problèmes différents[81]. Tant l'analyse de systèmes que la recherche opérationnelle visent à identifier un état optimal pour un système donné afin d'atteindre un but souhaité. Mais si d'une part la recherche opérationnelle semble être considérée comme un sous-domaine des mathématiques appliquées, surtout dans le contexte des affaires militaires[82], l'analyse des systèmes est parfois considérée comme une extension de la recherche opérationnelle en dehors de la sphère militaire[83] et se compose d'une partie ingénierie et d'une partie gestion de systèmes. Ce trio – analyse, ingénierie et gestion des systèmes – est appliqué à une multitude de domaines et de disciplines. Il mobilise des outils provenant des mathématiques, de l'informatique, de la technologie, de l'économie et des sciences sociales. Toutefois, l'extension à d'autres domaines s'est faite aussi sous le chapeau de la recherche opérationnelle[84] : comme on le voit, beaucoup de confusion règne sur le rapport entre ces deux domaines et un travail d'éclaircissement, analogue à celui-ci sur les théories de la complexité, mériterait d'être mené.

Les tentatives de classification

Ayant d'abord traité le thème de la complexité dans nos études d'histoire de la philosophie[85], nous avions comme seul objet de recherche le concept de complexité. À partir de la bibliographie d'un seul des protagonistes dont nous parlerons ici, le penseur français Edgar Morin, nous avions reconstruit un réseau de penseurs et de scientifiques qui nous ont paru vite très hétérogènes. Dans l'absence de critères pour nous orienter dans cette littérature composite, nous pensions naïvement qu'il suffirait de suivre le mot « complexité » pour connaître tous les autres membres d'une famille que nous présupposions unique et unifiée. Nous avons commencé à regarder si les auteurs repérés se citaient mutuellement ou s'ignoraient. L'existence de groupes structurés et leur étanchéité relative n'a pas tardé à nous sauter aux yeux. Ces groupes, plus ou moins grands, se composaient d'un certain nombre de personnes qui partageaient des concepts, des cadres opérationnels, et qui pour la plupart ignoraient les ressorts opérationnels des autres groupes.

Faute de travaux sociohistoriques d'envergure sur le non-domaine des théories de la complexité, ses principaux analystes se révèlent être souvent des scientifiques ou des penseurs qui sont aussi des protagonistes du domaine qu'ils décrivent. Nous avons

[81] Hooker, C.A. (ed.), *Philosophy of Complex Systems*, volume 10, dans Gabbay, D.M., Thagard, P. & Woods, J. (ed.), *Handbook of the Philosophy of Science*, Amsterdam: Elsevier / North Holland, 2011, pp. 725-726.

[82] Thomas, W., « The Heuristics of War : Scientific Method and the Founders of Operations Research », *The British Journal for the History of Science*, 2007, vol. 40, n. 2, pp. 251-274.

[83] Johnson, S.B., « Three Approaches to Big Technology : Operations Research, Systems Engineering, and Project Management », *Technology and Culture*, 1997, vol. 38, n. 4, pp. 891-919.

[84] Kaufmann, A. & Faure, R., *Introduction to Operations Research. Volume 47 in Mathematics in Science and Engineering*, New York, Academic Press, 1968 ; Taha, H.A., *Operations Research. An Introduction*, Upper Saddle River, Pearson, 2007 ; Hillier, F.S. & Lieberman, G.J., *Introduction to Operations Research*, New York, McGraw-Hill, 2001.

[85] Li Vigni, F., *Introduzione al pensiero complesso di Edgar Morin*, mémoire de licence en Philosophie de la connaissance et de la communication, Università degli Studi di Palermo, 2009.

dégagé cinq typologies de mise en ordre des théories de la complexité. En voici une liste critique :

1. Lectures non-structurées. Le philosophe américain Nicolas Rescher reprend la liste du physicien Seth Lloyd, basé au MIT et membre depuis le début du SFI, pour soutenir simplement que les « modes de la complexité sont multiples »[86]. Si Lloyd essayait de proposer quelques catégories pour les différents types de complexité listés, Rescher renonce à chercher des critères qui lui permettraient de définir des groupes. Un autre exemple d'ouvrage qui aborde quelques-unes des théories de la complexité sans chercher à en déceler des structures socio-épistémiques en suivant des critères précis, est *Growing explanations* dirigé par Norton Wise et publié en 2004[87]. Plusieurs représentants des sciences humaines et sociales américains et français y abordent le problème de la « complexité », sans le définir autrement que par la tendance des sciences contemporaines à construire de plus en plus leurs explications à partir des simulations numériques. Plusieurs cas d'étude sont pris en compte, certains relevant des domaines ou des sous-domaines des théories de la complexité telles que nous les définissons ici, d'autres n'y rentrant point. En effet, le critère commun des contributeurs à l'ouvrage, à savoir la perception d'une sorte d'« air du temps » observable dans plusieurs domaines des technosciences, peut mener à des juxtapositions arbitraires.

2. Lectures pacificatrices. Certains auteurs proposent des visions conciliatrices, qui tendent à considérer comme unifiés des courants qui, en fait, s'ignorent voire s'opposent mutuellement. Le mathématicien américain des systèmes dynamiques, Ralph Abraham, a publié en 2011 une « généalogie de la complexité », qui propose une vision homogène, unifiée et pacifique d'un certain nombre de théories qu'il rassemble sous un chapeau unique[88]. Il en repère les racines dans la cybernétique, la systémique et les mathématiques des systèmes dynamiques. Mais il considère que les trois branches se sont unifiées au cours des années 1970. Tout en utilisant le terme de « parapluie » pour décrire de manière métaphorique le concept de complexité, Abraham représente comme intégrés trois courants qui sont, à bien les regarder, autonomes. Dans son analyse il n'y a qu'une seule théorie de la complexité. Cette description non seulement efface des frontières qui, pour les groupes concernés, existent bel et bien, mais elle exclut aussi d'autres conceptions et usages du concept de complexité. Par exemple, interrogé sur la complexité algorithmique de Kolmogorov et sur la position qu'elle aurait dans l'esquisse qu'il donne dans son article, Abraham répond qu'il ne s'agit que d'une « coïncidence de termes »[89]. Pourtant, ceci peut être dit de toute *tradition* ou groupe par rapport à tout autre. Par ailleurs, le mathématicien

[86] Rescher, N., *Complexity: a philosophical overview*, New Brunswick, London, Transaction Publishers, 1998, pp. 2-3.
[87] Wise, N. (ed.), *Growing explanations*, Durham & London, Duke University Press, 2004.
[88] Abraham, R.H., « The Genesis of Complexity », *World Futures: The Journal of Global Education*, 67: 4-5, 2011, pp. 380-394. Disponible en ligne : http://dx.doi.org/10.1080/02604027.2011.585915.
[89] Mail de Ralph Abraham, 13.04.13.

inclut dans son tableau des acteurs qui, selon nos critères, ne devraient pas y être positionnés. C'est le cas de James Lovelock, père de l'hypothèse Gaïa. En examinant les discours et la bibliographie de Lovelock, ainsi qu'en interrogeant un de ses collaborateurs[90], nous découvrons que le terme de complexité est loin d'y être employé systématiquement comme le font, à l'inverse, les autres groupes listés ici. Lovelock et ses disciples utilisent le concept de système et celui de feedback, provenant respectivement de la systémique et de la cybernétique, mais ne s'inscrivent point dans aucune théorie de la complexité. Dans la même veine, en 1999 le systémicien belge Charles François avait publié un article, semblable à celui d'Abraham, dans lequel il rangeait dans la famille systémique et cybernétique des chercheurs et des chercheuses qui, selon nos critères, nous paraissent étrangers à ce courant[91].

3. Lecture réductrices. L'analyse de certains observateurs réduit, plus ou moins intentionnellement, le non-domaine des théories de la complexité à un seul acteur ou à un seul centre de recherche, avec l'effet performatif de promouvoir une approche plutôt qu'une autre ou, à l'inverse, de minorer (ou d'invisibiliser) certains courants. Nous pensons par exemple à ce dossier de *La Recherche* de mai 2012, n° 464, intitulé « Systèmes complexes » et entièrement dédié à la théorie des réseaux d'Albert-László Barabási ou au numéro des *Cahiers du Centre de Recherche en Epistémologie et Autonomie* de l'École Polytechnique, où la philosophe belge Isabelle Stengers désamorçait la paternité de la complexité attribuée au Groupe des Dix[92] pour la réattribuer à son inspirateur, Ilya Prigogine[93]. Nous pensons aussi au livre très cité du journaliste scientifique, Mitchell Waldrop, qui raconte l'histoire du SFI dans un livre intitulé simplement *Complexity*[94]. Les exemples de cette catégorie d'analyse des théories de la complexité abondent.

4. Lectures normatives. Des visions qu'on peut qualifier d'« internalistes » ou d'épistémologiques proposent des distinctions normatives, là encore avec des effets performatifs et d'invisibilisation, même s'ils sont involontaires, ce qui s'éloigne par définition d'une approche sociohistorique symétrique. Un premier exemple de cette catégorie concerne Edgar Morin, auteur d'un texte qui distingue entre la « complexité restreinte », celle des scientifiques appartenant à la *tradition* que nous avons appelée *des systèmes dynamiques* (voir plus bas), et la « complexité générale », celle de philosophes qui réfléchiraient au changement de paradigme nécessaire dans les savoirs

[90] Commentaire personnel d'Andrew Watson, 24 mars 2016.

[91] François, C., « Systemics and Cybernetics in a Historical Perspective », *Systems Research and Behavioral Science*, 1999, n. 16, pp. 203-219.

[92] Chamak, B., *Le Groupe des Dix ou les avatars des rapports entre science et politique*, Monaco, Editions du Rocher, 1997.

[93] Stengers, I., « Les généalogies de l'auto-organisation », Cahier du CREA, n. 8, 1985b, pp. 7-104.

[94] Waldrop, M.M., *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, New York, Simon & Schuster Paperbacks, 1992.

pour abandonner le réductionnisme de la « science classique »[95]. Un autre exemple, issu d'une autre *tradition*, concerne l'ingénieur Guillaume Deffuant et un groupe de neuf autres chercheurs et chercheuses en sciences naturelles et sociales, qui ont publié en 2015 un texte proposant de diviser l'étude de la complexité en « trois grandes tendances ou trois visions »[96]. Une première vision serait issue des mathématiques et de la physique, et disposerait d'outils mathématiques aboutis ; une deuxième vision dépendrait plutôt de l'informatique et serait en quête d'instruments nouveaux ; enfin une troisième vision concernerait les sciences humaines et sociales, qui manqueraient de formalisation. Cette distinction sépare des courants qui sont à l'intérieur de ce que, selon nos critères, apparaît comme une seule *tradition* parmi les sept que nous avons repérées ici (à savoir celle *des systèmes dynamiques*). Un autre exemple de lecture normative est l'article de Sam Schweber et Matthias Wächter, dans lequel les auteurs soutiennent que, grâce à l'ordinateur, les sciences en général, mais la physique et la chimie en particulier, traversent une révolution au sens de Ian Hacking, interdisciplinaire et multi-niveaux[97]. Si ces chercheurs soulignent des aspects épistémologiques intéressants relativement au rôle des modèles et des simulations numériques, ils attribuent une importance excessive à ce qu'ils appellent le domaine des systèmes complexes, qui par ailleurs est peu ou mal défini. Enfin, un troisième exemple concerne le livre *Phylosophy of Complex Systems* dirigé par le philosophe australien Cliff Hooker[98]. Bien qu'il cite Poincaré, von Bertalanffy et Wiener comme des exemples des premières tentatives d'approche de la « complexité », le livre réfléchit sur le chaos et les *traditions des systèmes dynamiques*, notamment sur le SFI, sur l'école de Prigogine et celle de Hermann Haken. Hooker regrette le manque de réflexion philosophique sur les systèmes complexes, qui se reflète dans le livre par le profil des intervenants, qui ne sont pas des philosophes mais des scientifiques. Toutefois, parmi les rares exemples de philosophes ayant réfléchi sur la complexité, dont William Wimsatt[99], cité par Hooker, plusieurs de ceux que nous allons indiquer dans ce qui suit ne sont pas cités dans ce livre.

5. Lectures cartographiques. Un certain nombre de textes propose des analyses très intéressantes et détaillées pour l'historien et le sociologue. Ces travaux définissent les sous-groupes de celles que nous définissons comme une ou deux *traditions* différentes,

[95] Morin, E., « Complexité restreinte, complexité générale ». *Colloque « Intelligence de la complexité : épistémologie et pragmatique », Cerisy-la-Salle*, 2005, disponible en ligne : http://www.learndev.org/dl/BtSM2007/EdgarMorin-FR.pdf.

[96] Deffuant, G., Banos, A., Chavalarias, D., Bertelle, C., Brodu, N., Jensen, P., Lesne, A., Müller, J.-P., Perrier, E. et Varenne, F., « Visions de la complexité. Le démon de Laplace dans tous ses états », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, n. 23, pp. 50-51.

[97] Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *op. cit.*

[98] Hooker, C.A. (ed.), *Philosophy of Complex Systems, op. cit.*

[99] Wimsatt, W., *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings*, Cambridge & London, Harvard University Press, 2007.

mais ratent d'autres *traditions*. Nous pensons aux travaux dits de « phylomémèse »[100] ou d'« épistémologie quantitative »[101] portés par deux membres de l'Institut des Systèmes Complexes de Paris[102] ou à celui d'un groupe de chercheurs de l'Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpin de Lyon[103]. Ces articles proposent des cartographies scientométriques des sous-domaines des SSC. Dans cette catégorie nous classons aussi la cartographie de plusieurs théories de la complexité mise en ligne par le sociologue médical Brian Castellani[104], dont on peut indiquer le degré de finesse mais dont certaines des analyses sont discutables, notamment quant aux filiations qu'il propose.

Dans ce Prologue, nous tâchons de dépasser empiriquement et méthodologiquement ces cinq typologies, pour essayer de restituer ce domaine vaste et hétérogène dans sa complexité et pour faire apercevoir, autant que possible, sa profondeur historique. Empiriquement, parce que ces textes négligent une partie des autres *traditions* des théories de la complexité. Méthodologiquement, parce que ces textes abordent souvent la question avec un regard purement épistémologique, mais aussi parce qu'ils sont produits par des chercheurs et des chercheuses qui œuvrent à l'intérieur d'une ou plusieurs des *traditions* qu'ils ou elles décrivent. Ils ou elles produisent ainsi ce qu'on appellera des *histoires indigènes*[105] : il s'agit d'« histoire[s] produite[s] par les acteurs d'une discipline eux-mêmes et qui porte[nt] sur cette dernière, étant entendu que celui qui parle d'histoire indigène adopte une perspective extérieure à celle-ci »[106]. Les histoires indigènes possèdent des effets performatifs et accomplissent des réglages de compte, raison pour laquelle nous les considérons et traitons comme des sources primaires.

[100] Chavalarias, D. & Cointet, J.-F., « Phylomemetic patterns in science evolution. The rise and fall of scientific fields », *Plos One*, 2013, vol. 8, n. 2, e54847, disponible en ligne : http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0054847.

[101] Chavalarias, D. & Cointet, J.-P., « The reconstruction of science phylogeny », *arXiv*:0904.3154v3, 20 juillet 2010.

[102] Cointet, J.-P. & Chavalarias, D., « Multi-level science mapping with asymmetrical paradigmatic proximity », *Networks and heterogeneous media*, 2008, vol. 3, n. 2, pp. 267-276.

[103] Grauwin, S. et al., « Complex Systems Science », *op. cit.*

[104] Castellani, B. & Hafferty, F.W., *Sociology and Complexity Science*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2009 ; Castellani, B., « Brian Castellani on the Complexity Science », site de *Theory Culture & Society*, 9 octobre 2014, disponible en ligne : https://www.theoryculturesociety.org/brian-castellani-on-the-complexity-sciences/ ; Castellani, B., *Map of Complexity Science*, Cleveland, OH. Courtesy of Arts and Science Factory, LLC, dans Börner, K. & Theriault, T.N., « 9th Iteration (2013) : Science Maps Showing Trends and Dynamics », *Places & Spaces : Mapping Science*, disponible en ligne : http://scimaps.org/mapdetail/map_of_complexity_sc_154.

[105] Quelques exemples d'histoires indigènes : Dupuy, J.P., « L'essor de la première cybernétique (1943-1953) », Cahier du CREA, n. 7, 1985, pp. 7-139 ; Dupuy, J.P., *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1999 ; Hammond, D., *The Science of Synthesis. Exploring the Social Implications of General System Theory*, Boulder, University of Colorado, 2003 ; Stengers, I., « Les généalogies de l'auto-organisation », *op. cit.* ; Petitot, J., « Les modèles morphogénétiques de René Thom », dans Bourgine, P. & Lesne, A., *Morphogenèse. L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, pp. 288-297.

[106] Feuerhahn, W., « Instituer les neurosciences sociales », *op. cit.*

Le concept de tradition

Le concept de *tradition* permet d'organiser les théories de la complexité de manière à les rendre intelligibles d'un point de vue à la fois théorique, social et chronologique. Deux de nos interviewés ne sont pas d'accord avec notre classification ; les citer nous aidera à mieux expliquer notre focale. Le physicien Hervé Zwirn nous a dit que :

> « Une classification doit être faite sur des critères homogènes. Si vous mettez ensemble les sciences des systèmes complexes et la complexité algorithmique, c'est comme si vous vouliez faire une classification dans laquelle vous mettez l'aéronautique et le centimètre. Ça n'a aucun sens. La complexité algorithmique n'est pas un domaine, c'est une unité de mesure. C'est un moyen de mesurer un certain type de complexité »[107].

Après avoir lu une première version de ce texte, le mathématicien Daniel Krob nous a écrit une remarque semblable à celle de Zwirn :

> « je pense qu'il faudrait exclure la complexité de Kolmogorov et la complexité algorithmique de votre champ d'étude. Ces deux théories […] ont un champ d'application complètement différent des autres traditions que vous citez : la complexité algorithmique traite […] de la complexité d'algorithmes ; la complexité de Kolmogorov traite […] de la complexité de l'information […] alors que toutes les autres traditions étudient la complexité de 'systèmes' […] J'aurais donc tendance – pour pouvoir comparer ce qui est comparable – de restreindre mon champ d'investigation aux traditions qui traitent uniquement de la complexité des 'systèmes' et à exclure les autres […] Ça vous permettra sans doute de mettre en évidence que ces traditions diverses se sont séparées parce qu'elles ne concernent pas les mêmes systèmes […] ça me parait important que vous fassiez cet effort de recentrage car sinon vous allez vous retrouver à mélanger des torchons et des serviettes »[108].

Si Zwirn parle de « domaine[s] » et Krob d'objets d'études (les « systèmes » versus les « algorithmes »), tous les deux posent un problème de commensurabilité entre les théories en présence et tous les deux prennent comme exemple les mêmes théories (complexité algorithmique et complexité de Kolmogorov). Toutefois, nous pensons pouvoir parler de *tradition* pour toutes ces théories, puisque ce qui nous guide *a minima* et d'un point de vue socio-historique ce sont les communautés qui s'auto-constituent autour d'un usage quelconque du terme « complexité » de manière

[107] Entretien avec Hervé Zwirn, 11.01.16.
[108] Mail de Daniel Krob, 10.11.17.

systématique et programmatique. Surtout, à la différence de Zwirn et Krob, nos critères ne sont pas uniquement épistémiques.

Dans un article sur les *traditions* principales de la sociologie (Marx, Weber, Durkheim, etc.), Randall Collins a exposé une classification quadripartite des possibles typologies de *traditions* repérables dans sa propre discipline[109]. Nous ne reprenons pas sa taxonomie ici, en nous contentant de son approche et de sa définition. En préférant les relations sociales aux contenus théoriques pour les repérer, Collins définit une *tradition* comme ce dont une communauté se souvient pour trouver une identité commune et dont elle assure la transmission d'une génération à l'autre. La notion de *traditions inventées* d'Eric Hobsbawm et Terence Ranger trouve aussi sa pertinence, puisque la plupart des groupes sociaux dont il est question ici décident de constituer leur horizon de référence et ne s'y trouvent pas toujours dans un rapport de filiation directe[110]. Nous avons choisi le concept de *tradition*, puisque nous croyons qu'il permet de détecter une certaine cohérence dans les groupes que nous repérons, ainsi qu'une continuité entre des générations diachroniques. Les *traditions* dont nous parlons dans ce texte désignent des groupes socio-épistémiques qui varient en termes d'échelles de pertinence et de morphologie : ils peuvent recouvrir, ou pas, une discipline[111], un paradigme[112], un champ au sens bourdieusien, une approche d'enquête ou un domaine de recherche. Le concept de tradition est plus précis que celui de « famille » ou de « nébuleuse », et par rapport à celui de paradigme il permet de souligner les continuités au-delà des ruptures. Il nous permet aussi de ne pas utiliser le terme de « réseau », que nous avons mis à distance dans l'Introduction générale.

Pour notre objet d'étude, une *tradition* existe à partir du moment où 1) un ensemble de personnes partagent une définition plus ou moins équivalente de la complexité, un certain nombre de références, d'espaces de rencontre[113], de revendications et de projets épistémiques, institutionnels, sociaux ou politiques ; 2) cet ensemble de personnes se perçoivent comme un groupe et marquent des frontières avec d'autres groupes, en les ignorant, en les critiquant ou en les considérant comme non-pertinents (un de nos

[109] Collins, R., « Les traditions sociologiques », *Enquête*, n. 2, 1995, mis en ligne le 26 janvier 2007, consulté le 12 avril 2014, disponible en ligne : http://enquete.revues.org/302.

[110] Hobsbawm, E. & Ranger, T. (éd.), *The Invention of Tradition*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.

[111] Le concept de tradition nous permet de saisir des groupes hétérogènes en termes quantitatifs (les différentes communautés n'ont pas la même taille) et qualitatifs (elles ne jouissent pas de la même légitimité dans le champ scientifique). Toutes les traditions que nous traitons ne sont pas engagées dans un effort de légitimation disciplinaire. Les traditions des théories de la complexité peuvent être des nouvelles disciplines, des nouveaux domaines interdisciplinaires, ou simplement des nouvelles approches ou des nouvelles spécialités.

[112] Les traditions des théories de la complexité que nous avons repérées peuvent ne pas être construites autour d'un paradigme, ou peuvent à l'envers en recouvrir plusieurs ou seulement le bout d'un seul. En outre, le concept de paradigme implique une rupture (tandis que nous soulignons les continuités) et résulte intellectuellement figé, une fois la rupture advenue.

[113] Pour définir une *tradition*, les institutions au sens strict ne sont pas discriminantes : il peut y avoir des individus qui ne possèdent pas de rattachement institutionnel particulier et qui pourtant agissent bel et bien comme un groupe à l'identité commune. C'est pour cela que nous préférons parler plus en général d'« espaces de rencontre ».

interviewés parle de « sensibilité[s] »[114] différentes pour se référer à celles que nous appelons *traditions*). Nous appelons *horizon de rétrospection* l'ensemble des concepts opérationnels communs à un groupe social : il s'agit de l'ensemble des références qu'un ensemble de chercheurs et de chercheuses mobilise, à un moment historique donné, pour les nécessités du présent, en soutenant des visions du champ contre d'autres versions rivales, ou en aplatissant les rivalités et les décalages existants[115]. Un *horizon de rétrospection* représente la boîte à outils épistémologique, conceptuelle et technique dans laquelle puise le groupe pour constituer son domaine et pour mener ses recherches. Cela ne veut pas dire que tout l'outillage conceptuel du groupe se limite à ce qu'a déjà dit l'ensemble des auteurs présents dans l'*horizon*. Ce dernier est plutôt le bouillon culturel dans lequel ont baigné les membres d'une tradition, l'environnement intellectuel d'où ils tirent le langage commun qui leur permet de s'entendre sur un certain nombre de points épistémiques, pratiques et idéologiques. Nous avons identifié au moins quatre manières dont les chercheurs et les chercheuses peuvent construire ou faire référence à un *horizon de rétrospection* : 1) en mentionnant régulièrement et explicitement, dans les publications ou dans les discours, les sources par rapport auxquelles ils ou elles se mettent en continuité ; 2) en faisant une *histoire indigène* du domaine de recherche dans lequel les scientifiques, devenus historiens, se placent ou placent des scientifiques proches d'eux ; 3) à travers la pédagogie, en écrivant des manuels, des livres vulgarisateurs ou en donnant des cours introductifs sur le contenu de l'*horizon de rétrospection* ; 4) en s'appuyant, enfin, sur le travail de vulgarisation d'un journaliste ou d'un médiateur scientifique dont ils estiment la synthèse.

Un mot doit être dit sur la perspective historiographique adoptée dans ce Prologue. Si l'on avait suivi le fil chronologique, si l'on était parti d'un seul point de départ bien identifié pour décrire et repérer les groupes, ceux-ci auraient explosé, se seraient émiettés et le panorama aurait été inintelligible ou incomplet. Si l'on était parti, par exemple, de la cybernétique, on serait parvenu à des domaines qui n'ont rien à voir avec la « complexité », car les rencontres Macy ont influencé nombreux domaines et même le langage courant[116]. Prendre en compte les *horizons de rétrospection* des théories qui se revendiquent de la complexité, et seulement de celles-ci, c'est une manière de cibler les groupes par rapport à ce qui fait leur identité commune de manière explicite et militante. Il ne s'agit pas de justifier ou d'interpréter le passé par le biais du présent. Notre approche permet plutôt de voir comment les groupes construisent leur propre *horizon de rétrospection*, souvent en y incluant des auteurs qui ne se sont jamais réclamés de la complexité ou qui l'ont même contrecarrée (c'est le

[114] Entretien avec Jean-Paul Delahaye, 02.06.14.

[115] Auroux, S. & Colombat, B., « L'horizon de rétrospection des grammairiens de l'*Encyclopédie* », *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, n. 27, 1999, mis en ligne le 04.08.07, consulté le 14.10.12 ; Auroux, S., « Histoire des sciences et entropie des systèmes scientifiques. Les horizons de rétrospection », dans Schmitter, P. (dir.), *Geschichte der Sprachtheorie*. 1. *Zur Theorie und Methode der Geschichtsschreibung der Linguistik : Analysen und Reflexionen*, Tübingen, Narr, p. 29, p. 36.

[116] Dupuy, J.-P., *Aux origines des sciences cognitives*, *op. cit.*

cas de René Thom[117], critique de la notion de complexité et pourtant cité dans la *tradition des systèmes dynamiques* comme l'un des pères spirituels). Également, le concept de *tradition* nous sert à montrer la *longue durée* de chacun de ces groupes, non pas pour nier leur pouvoir innovateur mais pour indiquer qu'ils n'auraient pas pu se constituer sans se référer à un passé, jugé crédible, sur lequel s'appuyer pour se légitimer. Inversement, se focaliser uniquement sur le présent nous aurait fait perdre en profondeur historique et nous aurait fait négliger les modalités de construction des identités intellectuelles et les boîtes à outils où puisent les membres des groupes.

Les traditions des théories de la complexité

Nous avons nommé chaque *tradition* en référence à son *horizon de rétrospection*. Le choix de nous concentrer sur les références partagées plutôt que sur la préoccupation spécifique de chaque groupe pour en déterminer l'identité, relève non seulement d'un souci d'historien attentif à la *longue durée*, mais aussi de la nécessité de relativiser les réclamations de certains groupes quant à la réelle paternité du concept. Par exemple, tant une *tradition cybersystémique* qu'une *tradition des systèmes dynamiques* disent travailler sur les « systèmes complexes » : de quel droit devrions-nous appeler *tradition des systèmes complexes* l'une plutôt que l'autre ?
Pour chacune des traditions des théories de la complexité nous proposons d'identifier : 1) les représentants principaux, 2) les espaces de rencontre, 3) le répertoire conceptuel et technique, 4) la définition de complexité, 5) l'*horizon de rétrospection*, 6) ainsi que les projets épistémiques et/ou politiques. Les « représentants » peuvent être des chercheurs et des chercheuses en sciences de la nature et en SHS, des ingénieurs, des entrepreneurs, des institutions, des sociétés savantes, des groupes et des collectifs plus ou moins formels : des rapports de conflictualité, aussi bien que des stratégies d'alliance et de légitimation, les traversent et en déterminent l'évolution. Par « espaces de rencontre », nous entendons des journaux, des conférences, des centres de recherche, des départements universitaires, des lieux informels ou des tribunes : ce sont aussi des lieux de construction et de diffusion des savoirs et des savoir-faire produits par les communautés. La notion de « répertoire conceptuel et technique » se réfère aux concepts, aux méthodes et aux techniques que les groupes partagent. Par « définition de complexité » on se réfère à celle qui est officiellement affichée par chaque groupe, qui parfois coïncide avec celle qui circule dans les pratiques et les publications des individus inscrits dans la *tradition*, mais qui parfois s'écarte de la pléthore de définitions spécifiques, alternatives et concurrentes qui circulent parmi les représentants. Comme nous avons déjà illustré l'*horizon de rétrospection*, un mot sur les « projets épistémiques et/ou politiques » : il s'agit souvent de discours d'ordre

[117] Pomian, K. (ed.), *La querelle du déterminisme*, Paris, Gallimard, 1990.

théorique et/ou pragmatique dans une *économie des promesses technoscientifiques*[118] qui présuppose un public vaste et hétérogène, et parfois d'objectifs théoriques et/ou pragmatiques adressés à des publics plus petits et spécialisés.

L'archipel des traditions cybersystémiques (pensée complexe, complexité par le bruit, etc.)

Partagent le même *horizon de rétrospection* et les mêmes concepts opérationnels plusieurs groupes sociaux, d'où notre choix de parler d'« archipel » des *traditions cybersystémiques*. Toutefois, tous les représentants de cet archipel ne peuvent être considérés comme faisant partie des théories de la complexité. Nous citerons celles pour lesquelles une certaine ambigüité existe, pour essayer de l'expliciter.

Représentants. Un filon de cette *tradition* regroupe des intellectuels et des scientifiques français qui se sont donné le nom de « Groupe des Dix »[119]. Médecins, biologistes, ingénieurs, économistes, sociologues, anthropologues, philosophes et hommes politiques se sont ainsi rassemblés pour discuter de thèmes comme la croissance économique, le programme génétique, la révolution informationnelle, ou bien les relations Féminin-Masculin. Les participants ayant écrit sur la complexité, chacun dans un cadre différent, sont Edgar Morin, Henri Atlan, Joël de Rosnay et Jean-Pierre Dupuy. L'ingénieur Jean-Louis Le Moigne, adepte de la théorie des systèmes dans le sillage de Ludwig von Bertalanffy, est en outre devenu un collaborateur de Morin au cours des années 1970 et peut être cité également ici[120].

Un usage systématique du concept de complexité est fait aussi par l'économiste néolibéral Friedrich von Hayek, raison pour laquelle nous le rangeons ici, même s'il n'a pas formé une école sous l'égide de ce concept.

Une autre tradition cybersystémique se réfère au sociologue allemand Niklas Luhmann[121]. Cependant, l'usage qu'il fait de ce concept ne justifie pas de considérer ses travaux et ceux d'éventuels disciples comme appartenant à une théorie de la complexité.

L'approche systémique ou systémico-relationnelle en psychologie, connue au niveau international, se réfère surtout à la deuxième cybernétique[122]. Le concept de système y est central, mais celui de complexité est utilisé de manière plus épisodique.

---

[118] Joly, P.-B., « On the economics of techno-scientific promises », dans Akrich, M., Barthe, Y., Muniesa, F. & Mustar, P. (ed.), *Débordements. Mélanges offerts à Michel Callon*, Paris, Presses des Mines, 2010, pp. 203-221.

[119] Chamak, B., *Le Groupe des Dix*, *op. cit.*

[120] Le Moigne, J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 1990.

[121] Influencé par son mentor Talcott Parsons, sociologue des systèmes, Luhmann a proposé un courant en sociologie, appelé la socio-cybernétique, d'inspiration systémique et cybernétique, en tant que cadre théorique général, pouvant expliquer tous les phénomènes sociaux. Pour Luhmann, les concepts fondamentaux sont ceux de système, d'information, de communication, d'autopoièse (Concept issu des travaux de Humberto Maturana et Francisco Varela, membres de ce qui a été appelée « deuxième cybernétique ») et bien sûr de feedback. Il utilise le terme de complexité pour pointer le fait qu'il existe toujours plusieurs possibilités de l'expérience et de l'action qui peuvent être actualisées : Luhmann, N., *Essays on self-reference*, New York, Columbia University Press, 1990 ; Luhmann, N., *Introduction to systems theory*, Cambridge, Polity Press, 2012.

[122] La deuxième cybernétique est représentée par Gregory Bateson (Bateson, G., *Steps to an Ecology of Mind : Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution, and Epistemology*, Chicago, University Of Chicago

La biologie des systèmes, qui entend unifier plusieurs approches différentes pour parvenir à une connaissance des cellules en tant que systèmes, possède un triple horizon de rétrospection[123]. Tout en faisant référence à la cybersystémique et tout en mentionnant souvent la complexité des systèmes qu'elle étudie[124], le mot n'est pas fédérateur de cette communauté[125].

Des sociétés de systémiciens[126] et de cybernéticiens[127] existent toujours[128]. Comme dans la systémique et dans la cybernétique des origines, les concepts de complexité et de systèmes complexes sont présents mais ne fédèrent pas des recherches[129].

Espaces de rencontre. Les membres du Groupe des Dix, qui étaient en réalité environ une vingtaine mais dont un noyau dur s'affirmait au fil des rencontres, se sont réunis informellement et régulièrement à Paris entre 1969 et 1976 dans la maison du médecin et entrepreneur Jacques Robin. Les réunions commençaient à 19h, elles s'interrompaient pour le repas et terminaient autour de minuit, parfois bien plus tard. Les membres du Groupe étaient assis en cercle et le conférencier parlait de son fauteuil pendant une heure. En 1981, le noyau dur du Groupe des Dix, composé d'Atlan, Dupuy, Attali et d'autres, fonde le Groupe Science/Culture, chapeau sous lequel opéraient trois sous-groupes : le Laboratoire de Dynamique des Réseaux, le Groupe de Recherche Interdisciplinaire et le Centre de Recherche en Épistémologie et Autonomie (CREA). Fondé à Paris en 1982 par Dupuy et Jean-Marie Domenach, le CREA,

---

Press, 1972) et l'École de Palo Alto (Marc, E. & Picard, D., *L'École de Palo Alto. Un nouveau regard sur les relations humaines*, Paris, Retz, 2000), par Heinz von Foerster (Foerster, H. von, *Understanding Understanding : Essays on Cybernetics and Cognition*, New York, Springer-Verlag, 2003) et son *Laboratoire pour un Ordinateur Biologique*, par Humberto Maturana et Francisco Varela (Maturana, H.R. & Varela, F.J., *Autopoiesis and cognition. The realization of the living*, Dordrecht, Reidel, 1980). Ce courant psychologique s'inspire parfois aussi des travaux d'Edgar Morin, Jean Piaget et, plus rarement, à une partie des travaux de la tradition des systèmes dynamiques (notamment la théorie du chaos et les sciences des systèmes complexes) (Telfener, U. & Casadio, L., *Sistemica. Voci e percorsi nella complessità*, Torino, Bollati Boringhieri, 2003).

[123] Quant aux outils, elle se réfère surtout à la biologie moléculaire et à la bioinformatique ; quant au cadre théorique général, elle se réfère à la cybersystémique, dont elle peut citer Wiener et von Bertalanffy ; en troisième lieu, elle se relie à l'ingénierie des systèmes telle qu'issue du MIT : Kitano, H. (ed.), *Foundations of Systems Biology*, Cambridge, MIT Press, 2001 ; Kitano, H., « Systems Biology : A Brief Overview », *Science*, 2002, n. 295, pp. 1662-1664.

[124] Comité editorial de Nature, « End of the interlude ? », *Nature Biotechnology*, p. 22, p. 1191.

[125] Pour complétude nous dirons qu'un manifeste programmatique pour une biologie des systèmes enrichie par l'approche « systèmes complexes », inscrite dans une tradition des systèmes dynamiques (voir plus bas), a été publié en 2008 par un groupe de chercheurs et chercheuses du Réseau National des Systèmes Complexes français : Lavelle, C., Berry, H., Beslon, G., Ginelli, F., Giavitto, J.-L., Kapoula, Z., LeBivic, A., Peyrieras, N., Radulescu, O., Six, A., Thomas-Vaslin, V. & Bourgine, P., « From molecules to organisms : towards multiscale integrated models of biological systems », *Theoretical Biology Insights*, 2008, n. 1, pp. 13–22. Des contacts de la sorte avec cette mouvance existent à plusieurs endroits, mais restent apparemment marginaux.

[126] Le site officiel de l'International Society for the Systems Sciences : http://isss.org/world/.

[127] Par exemple, le site de la Cybernetics society anglaise : http://cybsoc.org. Ou le site de l'American Society for Cybernetics : http://asc-cybernetics.org/ASC2017/.

[128] Pour une liste incomplète de ces sociétés, voir le site du Bertalanffy Center for the Study of Systems Science de Vienne : http://www.bcsss.org/the-center/legacy/system-movement/systems-and-cybernetics-societies/.

[129] L'institution peut-être la plus importante, concernant la systémique, est l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) de Vienne : http://www.iiasa.ac.at. Dans les sociétés et les centres cybernétiques et systémiques, les chercheurs et les chercheuses s'y trouvent en continuité scientifique, académique et sociale avec les fondateurs de ces domaines : Glanville, R., « Second order cybernetics », dans Parra-Luna (ed.), « Systems Science and Cybernetics », vol. 3 de l'*Encyclopaedia of Life Support Systems*, Oxford, EoLSS Publishers, 2002.

rattaché à l'École polytechnique[130], est reconnu comme le premier pôle de recherches en sciences cognitives en France. Il peut aussi être considéré comme la première institution s'occupant des systèmes complexes, mais, si dans les toutes premières années la notion de complexité s'inscrivait dans la tradition cybersystémique, dans la deuxième moitié des années 1990 l'approche inspirée du SFI prit le relais. Depuis 1986 Morin et Le Moigne sont en outre à l'origine d'un Réseau Intelligence de la Complexité, soutenu et animé par l'association européenne Modélisation de la Complexité (MCX) et par l'Association pour la Pensée Complexe[131]. Il faut ensuite mentionner le Centre Edgar-Morin[132], rattaché à l'EHESS et au CNRS, lequel, contrairement à ce que l'on pourrait penser, n'héberge pas de disciples du penseur, et l'on n'y mène pas d'enquêtes dans, avec ou sur la « pensée complexe ».

Quant à Hayek, il fut professeur d'économie à l'Université de Freiburg. À notre connaissance, des institutions formées autour des théories de la complexité de cet intellectuel allemand n'existent pas.

Répertoire conceptuel et technique. La cybernétique repose sur le concept de feedback ou de rétroaction, qui désigne la capacité d'un système dynamique de modifier son comportement sur la base des données reçues de l'environnement ou de son propre processus interne[133].

La systémique se donne comme objectif la mise en œuvre d'un ensemble de formules mathématiques capables de décrire tous les systèmes vivants et sociaux, indépendamment de leurs différences[134].

Ce qui, de ces deux méthodes, est repris par le Groupe des Dix, c'est la partie discursive et conceptuelle concernant les systèmes et leurs interdépendances internes et externes. Il en résulte surtout des théories discursives sur les systèmes complexes, sur le concept de complexité en général ou sur la « pensée complexe ». Ses membres ont publié des livres et des articles oscillant entre la philosophie et la vulgarisation. Edgar Morin, Henri Atlan, Joël de Rosnay et Jean-Pierre Dupuy sont les acteurs les plus connus et actifs dans la publication d'ouvrages à propos de la complexité et des

[130] Dosse, F., *L'empire du sens. L'humanisation des sciences humaines*, Paris, La Découverte, 1995 ; Feuerhahn, W., « Un tournant neurocognitiviste en phénoménologie ? Sur l'acclimatation des neurosciences dans le paysage philosophique français », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, vol. 2, n. 25, 2011, pp. 59-79.

[131] Site officiel du Réseau Intelligence de la Complexité : http://www.intelligence-complexite.org/.

[132] Il a changé de nom plusieurs fois dans son histoire : Centre d'Etudes de Communication de Masse (CECMAS) en 1960 lors de sa fondation par Georges Friedmann, il devient Centre d'Etudes Transdisciplinaires. Sociologie, Anthropologie, Sémiologie (CETSAS) en 1973. Il est renommé Centre d'Etudes Transdisciplinaires. Sociologie, Anthropologie, Politique (CETSAP) en 1983, puis Centre d'Etudes Transdisciplinaires. Sociologie, Anthropologie, Histoire (CETSAH) en 1992. Il est enfin rebaptisé Centre Edgar-Morin en 2008.

[133] Heims, S., *The Cybernetics Group*, Cambridge, MIT Press, 1991 ; Le Roux, R., *La cybernétique en France (1948-1970) : contribution à l'étude de la circulation interdisciplinaire des modèles et des instruments conceptuels et cognitifs*, Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 2010.

[134] Hammond, D., *The Science of Synthesis*, *op. cit.* ; Pouvreau, D., *Une histoire de la « systémologie générale » de Ludwig von Bertalanffy. Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*, Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 2013.

systèmes complexes[135], ayant eu par ailleurs une influence importante dans le développement de la conception soixante-huitarde de l'autogestion[136].
Pour Hayek, les concepts fondamentaux sont ceux de feedback, de système et d'auto-organisation. Appliqués aux systèmes économiques, ils servent à pointer l'imprédictibilité des marchés et suggérer l'inutilité de l'intervention étatique dans l'économie.
Définition. Le Groupe des Dix dit travailler sur les systèmes complexes, définis comme des ensembles auto-organisés émergents et régis par des phénomènes de récursivité.
Hayek définit les systèmes économiques comme des structures ou des phénomènes essentiellement complexes, car composés d'un grand nombre de variables et régis par des phénomènes de récursivité.
Horizon de rétrospection. Tous les filons de cet archipel font référence à la cybernétique et à la systémique. Dans sa définition canonique, la cybernétique se veut une discipline ou une méthode qui étudie les phénomènes d'autorégulation et de communication, propres tant aux organismes artificiels que naturels. Elle a été fondée dans les années 1940 pendant un cycle de Conférences Macy à New York par un groupe de mathématiciens, ingénieurs, anthropologues, philosophes et autres figures. Norbert Wiener, Warren McCulloch, Gregory Bateson ne sont que les noms les plus connus de ce collectif. Chez les grecs, il était utilisé pour se référer aux timoniers, aux manœuvriers ou aux gouverneurs politiques. Wiener l'applique à l'autogouvernement des machines, pour se référer aux pilotes automatiques dans les avions de guerre ou au système de pointage automatique des canons. Selon la définition de Wiener, la cybernétique est la science des systèmes à circuit fermé, dont l'action produit un changement dans l'environnement, qui à son tour se manifeste au système par le biais d'un feedback rétroactif.
La systémique est une approche qui s'est constituée aux États-Unis entre les années 1930 et les années 1950, suite aux efforts du biologiste et philosophe autrichien Ludwig von Bertalanffy[137]. Son souci était, d'un point de vue biologique, de trouver une façon d'étudier les êtres vivants en les traitant non plus comme des machines ou des robots, c'est-à-dire comme des systèmes en équilibre, mais comme des systèmes ouverts. D'un point de vue philosophique, il s'agissait pour lui d'abandonner la

[135] Morin, E., *La Méthode 1. La Nature de la Nature*, Paris, Seuil, 1977 ; Morin, E., *La Méthode 2. La Vie de la Vie*, Paris, Seuil, 1980 ; Atlan, H., *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Seuil, 2006 (1re éd. 1972) ; Atlan, H., *Entre le cristal et la fumée*, Paris, Seuil, 1979 ; Rosnay, J. de, *Le Macroscope*, Paris, Seuil, 1975 ; Dupuy, J.-P., *Ordres et Désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Paris, Seuil, 1982.
[136] Rosanvallon, P., *L'Âge de l'autogestion*, Paris, Seuil, 1976.
[137] En 1954, von Bertalanffy et ses collègues Ralph Gerard, Kenneth Boulding et Anatol Rapoport fondèrent la Society for the Advancement of General Systems Theory, qui avait son siège au Center for Advanced Study in the Behavioral Sciences de Stanford. Ayant pris une dimension globale, en 1988 l'association se donna le nom d'International Society for the Systems Sciences. Elle existe encore aujourd'hui.

méthode analytique fondée par Descartes, afin de façonner une approche holiste[138]. Pour von Bertalanffy, un système est un ensemble d'éléments en interrelation réciproque. La systémique partage la conviction organiciste selon laquelle l'ensemble est plus que la somme de ses parties.

Dans sa conférence pour le Prix Nobel en 1974[139], Hayek parla des systèmes économiques comme de phénomènes avec des structures « essentiellement complexes », en se référant à l'article de Warren Weaver sur la complexité désorganisée et organisée[140]. Dans ses publications sur la théorie des phénomènes complexes, il cite surtout des auteurs issus de la cybernétique[141].

Projets épistémiques et/ou politiques. Pour le Groupe des Dix, l'enjeu était celui de créer de nouveaux paradigmes, en réaction aux appareillages dominants du structuralisme et du marxisme, en SHS, et de la biologie moléculaire, en sciences de la vie. Ses membres se proposaient également de fournir un langage à la politique, entendue dans le cadre socialiste voire marxiste, pour qu'elle poursuive des réformes nourries de contenus scientifiques. Pour Morin, la pensée complexe est une méthode de recherche et pédagogique, privilégiant la tête bien faite à la tête bien pleine[142], pour aborder les connaissances et les enjeux politiques de manière holiste, interdisciplinaire et humble. Pour Atlan, la complexité indique un problème à résoudre et ne représente pas une solution clés-en-main[143].

Pour Hayek, la conscience de l'auto-organisation du système économique redonne légitimité à la théorie de la main invisible d'Adam Smith, en vertu de laquelle aucune entité centrale, tel que l'État, ne peut ni ne doit gouverner l'ensemble du marché. Autant le Groupe des Dix mobilise les concepts cybersystémiques en termes socialistes, autant Hayek part du même outillage conceptuel pour parvenir à une théorie ultralibérale.

L'archipel des traditions des systèmes dynamiques (sciences des systèmes complexes, synergétiques, etc.)

Plusieurs groupes sociaux partagent le même *horizon de rétrospection* et les mêmes concepts opérationnels provenant de la théorie des mathématiques des systèmes dynamiques. Certains d'entre eux se connaissent mutuellement, se côtoient et se citent occasionnellement, sans créer des liaisons plus stables. Bon nombre de chercheurs et de chercheuses de cet archipel ont participé, d'une manière ou d'une autre, à la mouvance interdisciplinaire de la théorie du chaos, d'autres sont issus de secteurs

[138] Bertalanffy, L. von, *General System Theory. Foundations, Development, Applications*, New York, George Braziller, 1969.

[139] Hayek, F.A. von, « Prize lecture : The pretence of knowledge », *Nobelprize.org*, Nobel Media AB 2014, accès du 27 octobre 2017, disponible en ligne : http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1974/hayek-lecture.html.

[140] Weaver, W., « Science and Complexity », *American Scientist*, n. 36, 1948, pp. 536-544.

[141] Hayek, F.A. von, *Studies in philosophy, politics and economics*, Chicago, University of Chicago Press, 1967.

[142] Morin, E., *La tête bien faite*, Seuil, Paris, 1999.

[143] Entretien avec Henri Atlan, 16.12.12.

disciplinaires plus traditionnels et ont décidé à un moment donné de leur carrière de contribuer, parfois sans s'y associer d'un point de vue institutionnel et social, à la mouvance de la complexité au sens rendu célèbre par le SFI.

Représentants. Le courant principal de cet archipel s'est donné le nom de « science de la complexité » ou de « science(s) des systèmes complexes ». Deux centres s'y inscrivent pleinement, sachant qu'il en existe en fait une soixantaine[144] : le SFI[145], pour son rôle de fondateur de cette mouvance, et l'ISC-PIF[146], qui n'est qu'une des concrétisations du volet français de cette tradition. Ce dernier institut est d'ailleurs assez représentatif de la catégorie de centres qui sont apparus dans plusieurs pays du monde avec une référence explicite au SFI. Au-delà des émules directs et formels, plusieurs spécialités, institutions, groupes et individus ont été influencés par le SFI[147], tandis que certains s'inscrivent dans une des *traditions des systèmes dynamiques* ou en mobilisent des courants, dont celui du SFI parmi d'autres[148].

---

[144] Wolfram, S., « It's Been 10 Years: What's Happened with *A New Kind of Science*? », *Stephen Wolfram blog*, May 7, 2012, disponible en ligne : http://blog.stephenwolfram.com/2012/05/its-been-10-years-whats-happened-with-a-new-kind-of-science/.

[145] Site officiel du Santa Fe Institute : https://www.santafe.edu.

[146] Site officiel de l'Institut des Systèmes Complexes – Paris Ile de France : http://iscpif.fr/.

[147] La Rand Corporation a intégré Gell-Mann et d'autres membres du SFI pour mettre l'expertise des systèmes complexes au service de problématiques géopolitiques (Alberts, D.S. & Czerwinski, T.J., *Complexity, global politics, and national security*, Washington, National Defense University, 1997, disponible en ligne : http://www.dodccrp.org/files/Alberts_Complexity_Global.pdf). Nous pensons également au livre de l'économiste Paul Krugman sur les systèmes économiques auto-organisés (Krugman, P., *The Self-Organizing Economy*, Cambridge, Blackwell Publishers, 1996), au livre collectif *Complex Systems and Social Pratices in Energy Transitions*, dédié à la problématique de la transition énergétique (Labanca, N. (ed.), *Complex Systems and Social Pratices in Energy Transitions. Framing Energy Sustainability in the Time of Renewables*, Berlin, Springer, 2017), aux travaux de Sandra Mitchell (qui a séjourné au SFI en 2001 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. H) sur la philosophie de la biologie (Mitchell, S.D., *Biological Complexity and Integrative Pluralism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003) ou encore au livre *The moment of complexity*, du philosophe des religions américain Mark Taylor (Taylor, M.C., *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*, Chicago, University of Chicago Press, 2003). De même, librement inspirés des théories de la complexité issues du chaos et du SFI, un certain nombre de chercheurs et de chercheuses en SHS ont proposé des analyses utilisant des concepts tels que la sensibilité aux conditions initiales, la bifurcation de l'état d'un système, la transition de phase, l'émergence ou les feedbacks récursifs. On peut nommer, par exemple, le sociologue Francis Chateauraynaud (Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces*, *op. cit.*), les politistes Paul Carney et Robert Geyer (Geyer, R. & Carney, P. (ed.), *Handbook on Complexity and Public Policy*, Cheltenham, Edward Elgar, 2015), les sociologues Marc Bessin, Claire Bidart et Michel Grossetti (Bessin, M., Bidart, C. & Grossetti, M. (ed.), *Bifurcations. Les sciences sociales face aux ruptures et à l'événement*, Paris, La Découverte, 2010), ou les sociologues et les philosophes d'inspiration New Age et secundo-cybernétique qui se sont réunis dans le double numéro spécial de la revue *Theory, Culture & Society* en 2006, autour de ce qu'ils appellent « tournant de la complexité » et qui concernerait tous les domaines de la société, de l'environnement et de la technique (Urry, J. (éd.), « Special Issue on Complexity », *Theory, Culture & Society*, 2005, vol. 22, n. 5, pp. 1-274 ; Urry, J., « Complexity », *Theory, Culture & Society*, 2006, vol. 23, n. 2-3, pp. 111-117).

[148] Nous pensons au Laboratoire de Biochimie de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, où l'étude théorique et applicative de la biologie synthétique et des systèmes s'enrichie des méthodes issues de la physique statistique. Pierre-Gilles de Gennes et certains de ses collaborateurs ont même fait référence aux travaux sur les réseaux auto-catalytiques de Stuart Kauffman, avec qui ils ont brièvement collaboré, et à ceux de Per Bak sur la criticalité auto-organisée (entretien avec Philippe Nghé, 11.02.16). Nous pensons aussi au Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems de Dresde, fondé en 1994 et focalisé sur l'étude de la matière condensée, de l'optique et de la biologie, en s'inscrivant dans des spécialités qui vont de la physique quantique à la physique statistique du chaos, jusqu'à la biologie des systèmes. Nous pensons également à d'autres scientifiques éparpillés dans plusieurs universités du monde, travaillant de façon

Un autre filon de cet archipel est représenté par le physicien russo-belge Ilya Prigogine et par son école, qui s'est institutionnalisée à l'Université Libre de Bruxelles dans le Centre Interdisciplinaire de Phénomènes Non-linéaires et de Systèmes Complexes (CENOLI), fondé par Grégoire Nicolis en 1991. Cette école a joué un rôle actif dans le déploiement de la théorie du chaos dans les années 1960 et 1970.

Les physiciens allemands Hermann Haken et Manfred Eigen sont souvent cités parmi les protagonistes des sciences de la complexité. Ils sont entrés en contact avec le SFI plusieurs fois pendant la première période de l'institut[149]. Cependant, Haken et Eigen ont construit et maintenu leurs groupes indépendamment du centre de recherche étatsunien. En outre, en étant à cheval entre la communauté du chaos et celle du SFI, et en faisant référence à la théorie de l'information de Shannon et aux hypercycles chimiques d'Eigen[150], Haken a travaillé au développement et à la diffusion de sa propre spécialité, qu'il a appelé la « synergétique », de manière alternative aux SSC[151].

Une situation semblable à celle de Haken concerne aussi les physiciens Albert-László Barabási et Stephen Wolfram, qui aujourd'hui dirigent respectivement un laboratoire et une entreprise à Boston. Ces chercheurs connaissent le SFI et sont connus de celui-ci. En tant qu'associés de l'institut, ils ont entretenu des interactions de citation, de collaboration ou de compétition.

Un dernier exemple de *tradition des systèmes dynamiques* est représenté par les cycles de conférences organisés autour de la personnalité du biochimiste allemand Otto Rössler, qui affiche la complexité et les systèmes complexes comme drapeau fédérateur, sans pour autant se référer uniquement au SFI, mais en restant plutôt en continuité et en rapport de filiation directe avec le chaos[152].

Il existe des petits groupes, des cycles de conférences ou des publications singulières, qui rassemblent des intervenants sous le mot de complexité sans aucune référence à des traditions particulières, même s'ils peuvent connaître ces traditions ou accueillir des individus qui s'y inscrivent[153].

---

individuelle sur des parties du domaine des SSC et en ne mobilisant qu'une partie des outils et des approches lancés par le SFI (entretien avec Joachim Krug, 18.11.15 ; entretien avec Johannes Berg, 18.11.15).

[149] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 4.

[150] Eigen, M., « Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules », *Naturwissenschaften*, 1971, vol. 58, n. 10, pp. 465-523 ; Eigen, M. & Schuster, P., *The Hypercycle : A principle of natural self-organization*, Berlin, Springer, 1979.

[151] Kroger, B., *Hermann Haken : From the Laser to Synergetics. A Scientific Biography of the Early Years*, Berlin, Springer, 2015 ; Haken, H., *Synergetics, an Introduction : Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology*, New York, Springer, 1983 ; Haken, H., *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*, Berlin, Springer, 2006.

[152] D'un point de vue thématique et social, ces conférences brassent encore plus largement et librement que le SFI, tout en se maintenant concentrées sur les domaines des sciences physiques, de la vie et des technologies (par exemple, Sanayei, A., Zelinka, I. & Rössler, O.E. (ed.), *ISCS 2013 : Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, Berlin, Springer, 2014 ; ou Sanayei, A., Rössler, O.E. & Zelinka, I. (ed.), *ISCS 2014 : Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, Berlin, Springer, 2015).

[153] À titre d'exemple, nous citerons les Journées Complexité Désordre organisées par Jean-Claude Lévy à Paris Diderot (voir par exemple, Lévy, J.-C.S. (ed.), *Complexité et désordre. Éléments de réflexion*, Les Ulis, EDP Sciences, 2015), où le terme « complexe » est employé en tant que synonyme de difficile, d'hétérogène,

Espaces de rencontre. Les instituts que nous avons cités, ainsi que d'autres du même genre, sont les lieux de rencontre les plus importants pour les différentes communautés mentionnées. Faute de départements dédiés dans les universités, souvent les membres des SSC ne peuvent conduire leurs recherches sur la complexité que dans ces tiers lieux. Des conférences internationales annuelles ou biannuelles existent aussi, mais jouent un rôle moins structurant. Les revues scientifiques exclusivement dédiées à ce domaine ne sont pas légions et ne sont pas vues comme suffisamment légitimes par les scientifiques eux-mêmes, qui restent fidèles aux journaux disciplinaires ou généralistes prestigieux.

Répertoire conceptuel et technique. Les chercheurs et les chercheuses qui composent ces communautés opèrent surtout à travers des modèles mathématiques, physiques et informatiques, dans la tentative de simuler les systèmes complexes naturels et humains. Une liste non-exhaustive de ces outils inclut les équations différentielles des mathématiques des systèmes dynamiques, les modèles à base d'agents, la théorie des réseaux, les automates cellulaires, la théorie des graphes, l'apprentissage automatique, la théorie des jeux, la physique statistique, les algorithmes génétiques, etc. Les concepts cybernétiques de feedback et d'auto-organisation sont très répandus aussi[154]. Un article d'Alain Turing, qui n'a jamais investi le terme de système complexe, constitue une autre référence d'une partie des *traditions des systèmes dynamiques*[155].

Définition. Dans cet archipel, la définition de systèmes complexes, compte tenu d'une série indéfinie de variations, est largement partagée et pourrait être résumée comme suit : les systèmes complexes sont des ensembles intégrés, composés d'un grand nombre d'éléments en interaction, résultats de processus d'évolution et dotés de propriétés émergentes, au sens où le niveau microscopique engendre une organisation macroscopique qui n'est pas prévisible à partir de ses constituants. Certains auteurs peuvent refuser le concept d'émergence et mettre l'accent plutôt sur d'autres aspects, en fonction de leurs propres perspectives disciplinaires.

Horizon de rétrospection. La théorie des systèmes dynamiques[156], dont les bases ont été jetées par les mathématiciens français Henri Poincaré, Jacques Hadamard et Pierre Duhem à la fin du XIX^{ème} siècle, et par le mathématicien russe Andreï Kolmogorov

---

d'imprédictible et en référence à certains courants de la physique de la matière, où le mot est employé occasionnellement (entretien avec Jean-Claude Lévy, 13.01.16).

[154] Les représentants de cet archipel de traditions ne construisent que dans des rares cas leur horizon de rétrospection à partir (aussi) de la cybersystémique. Les concepts de feedback et d'auto-organisation sont toutefois très répandus et, chez certains groupes, à certaines époques, presque omniprésents. Cela ne doit pas étonner, car les principes de la cybernétique ont beaucoup circulé, en colonisant nombreux domaines : de la biologie moléculaire aux sciences cognitives, des sciences de la Terre à la psychanalyse, de la climatologie jusqu'au management.

[155] Son modèle de morphogenèse visait à montrer que des formes ordonnées, telles que des stries et des tâches de couleurs alternées, peuvent émerger à partir de l'amplification de fluctuations instables dans un substrat homogène : Turing, A., « The Chemical Basis of Morphogenesis », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 237, n. 641, 1952, pp. 37-72.

[156] Cette théorie n'est pas à confondre avec la « dynamique des systèmes », issue des travaux cybernétiques et développée au MIT avec des finalités militaires et industrielles : Roberts, E.B. (ed.), *Managerial Applications of System Dynamics*, Cambridge, MIT Press, 1978.

dans la première moitié du XX^{ème}, s'est constituée dans un domaine cohérent au cours des années 1960 et 1970 grâce à la théorie du chaos, dont Edward Lorenz, David Ruelle, Stephen Smale, Ilya Prigogine et Benoit Mandelbrot sont quelques-uns des noms les plus connus d'une vaste communauté internationale[157]. Si toutes les traditions des systèmes dynamiques font référence à cette théorie, les SSC ont une relation très étroite avec la mouvance du chaos[158].

Projets épistémiques et/ou politiques. Pour les SSC, de part[159] et d'autre[160] de l'Atlantique, il s'agit de saisir et de résoudre les « problèmes réels » du monde. Leur objectif n'est pas seulement celui de comprendre et de décrire plus adéquatement les systèmes complexes tels que les écosystèmes, les villes ou les épidémies, mais aussi celui de mieux les prévoir et gérer.

Les autres courants de cet archipel sont plus théoriques et visent moins à mobiliser des groupes sociaux liés à la politique et à l'industrie.

La tradition de la complexité computationnelle (la théorie de la complexité)

La théorie de la complexité computationnelle, ou simplement théorie de la complexité, est une branche de la théorie du traitement de l'information dans l'informatique théorique. Tant d'un point de vue socio-épistémique que de taille, elle n'est pas à confondre avec la complexité algorithmique, que nous traitons plus bas, même si les deux approches peuvent travailler sur les algorithmes.

Représentants. Une analyse rapide des publications en « *computational complexity* » dans la base de données du *Web of Science* de Thomson Reuters montre que la plupart des universités actives dans ce domaine de recherche sont américaines et asiatiques, en particulier chinoises, avec quelques exemples français, anglais, suisses, italiens, indiens, russes et autres. Plus de 37.000 articles et plus de 28.000 actes de congrès ont

---

[157] Aubin, D. & Dahan, A., « Writing the History of Dynamical Systems and Chaos : *Longue Durée* and Revolution, Disciplines and Cultures », *Historia Mathematica* 29, 2002, pp. 273-339.

[158] Le rapport entre le champ lancé par le SFI, d'une part, et la théorie du chaos et les systèmes dynamiques, d'autre part, est visible premièrement dans la continuité socio-épistémique entre les deux domaines : une partie des protagonistes du chaos sont devenus des instigateurs des sciences de la complexité ; les feuilles de route, les bulletins, les articles et les livres scientifiques et de vulgarisation issus des sciences de la complexité mentionnent, depuis le début, les méthodes du chaos comme une ressource fondamentale ; lors des écoles d'été annuelles que le SFI tient depuis 1987 sur les systèmes complexes, des cours sont toujours tenus sur les méthodes issues du chaos et des mathématiques des systèmes dynamiques. Nous avons, en outre, interviewé plusieurs dizaines de chercheurs et chercheuses s'inscrivant dans les SSC, et si la vaste majorité confirme se référer aux systèmes dynamiques, un certain nombre a explicitement motivé son engagement dans telle mouvance après avoir lu le livre vulgarisateur de James Gleick sur le chaos (Gleick, J., *Chaos. Making a new science*, Londres, Sphere Books, 1988). Pour ce qui est de la France, l'un des animateurs du RNSC, Paul Bourgine, a reconnu la centralité de cette tradition en nous citant le *Handbook of Dynamical Systems* (Hasselblatt, B. & Katok, A., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 1A*, Amsterdam, North Holland, 2002) et en le définissant comme l'un des textes fondamentaux pour un scientifique des systèmes complexes (entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13) ; en outre, l'article *Vision de la complexité*, publié par neuf scientifiques du RNSC et par un épistémologue, cite Poincaré et Lorenz comme les premières sources des SSC (Deffuant, G. et al., « Visions de la complexité », *op. cit.*).

[159] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1.

[160] Bourgine, P., Chavalarias, D. et Perrier, E., *French Roadmap for Complex Systems. 2008-2009 Edition*, ISC-PIF, RNSC, IXXI, 2009, en ligne : http://www.iscpif.fr/tiki-index.php?page=Roadmap-fr.

été répertoriés. Il s'agit d'un domaine de recherche qui intéresse en première instance les informaticiens et les mathématiciens. *Google Books Ngram Viewer* montre que son explosion arrive dans les années 1980 et que le nombre de publications ne cesse d'augmenter depuis.

Espaces de rencontre. Depuis 1986, le lieu de rencontre principal de cette communauté est une conférence internationale qui a changé plusieurs fois de nom et qui est aujourd'hui connue sous le nom de *Conference on Computational Complexity*[161]. Soutenue par la National Science Foundation américaine en 1986 et organisée avec le support de l'association professionnelle internationale appelée Institut des Ingénieurs Electriciens et Electroniciens de 1987 à 2014, elle est organisée par la Computational Complexity Foundation depuis 2015[162]. Le *Journal of ACM* est une des revues scientifiques les plus influentes dans ce domaine.

Répertoire conceptuel et technique. La théorie des graphes, le temps de calcul, les machines de Turing, le problème P=NP, les algorithmes aléatoires, la physique statistique, ainsi que des mesures de complexité plus spécifiques, tels que la complexité des circuits, le modèle de l'arbre de décision ou les axiomes de Blum, sont tout autant des outils de cette théorie de la complexité.

La complexité algorithmique n'est pas un des outils de la complexité computationnelle, car selon des auteurs du domaine elle entrainerait des problèmes d'indécidabilité[163].

Définition. La complexité d'un problème informatique est représentée par la quantité de ressources computationnelles, de mémoire et de temps qui servent à le résoudre[164]. Cette branche de l'informatique théorique se préoccupe d'étudier la complexité intrinsèque d'une tâche computationnelle ou d'une classe de tâches computationnelles[165].

Horizon de rétrospection. Le domaine apparaît entre la fin des années 1960 et les premières années 1970. La première étude en complexité computationnelle est attribuée à Juris Hartmanis et Richard Stearns[166], qui se sont occupés de définir la complexité temporelle et spatiale d'un algorithme[167]. D'autres travaux fondateurs sont

[161] Le site officiel de la CCF : http://www.computationalcomplexity.org/foundation/.

[162] La section historique sur la conférence dans le site officiel de la CCF : http://www.computationalcomplexity.org/general.php.

[163] Arora, S. & Barak, B., *Computational Complexity : A Modern Approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009 ; entretien avec Cristopher Moore, 02.04.15.

[164] Moore, C. & Mertens, S., *The Nature of Computation*, Cambridge, Oxford University Press, 2011, p. 15.

[165] Goldreich, O., *Computational Complexity : A Conceptual Perspective*, Cambridge, Cambridge University Press, 2008 ; Papadimitriou, C., *Computational Complexity*, New York, Addison-Wesley, 1994.

[166] Stearns, R.E., « Juris Hartmanis : The Beginnings of Computational Complexity », dans Selman, A.L. (ed.), *Complexity Theory Retrospective*, New York, Springer, 1990.

[167] Hartmanis, J. & Stearns, R.E., « On the computational complexity of algorithms », *Transactions of the American Mathematical Society*, 1965, n. 117, pp. 285-306.

celui de Manuel Blum[168] sur le théorème de *speedup*, ainsi que ceux de Stephen Cook[169], de Leonid Levin[170] et de Richard Karp[171] sur les problèmes NP-complets.
Projets épistémiques et/ou politiques. Comprendre les structures mathématiques sous-jacentes à des problèmes différents ; comprendre comment ces structures permettent ou empêchent de résoudre ces problèmes ; rendre plus efficaces les logiciels[172].

La tradition de la complexité de Kolmogorov (ou de Kolmogorov-Solomon-Chaitin) (la théorie de la complexité de l'information)

Puisqu'elles traitent de problèmes apparemment similaires, la complexité algorithmique et la complexité computationnelle sont parfois confondues. En réalité, elles n'ont pas les mêmes débuts historiques, ni les mêmes méthodes, objets d'études et pointent sur des communautés différentes.
Représentants. La communauté travaillant sur la complexité de Kolmogorov est un groupe constitué de peu de chercheurs et de chercheuses, notamment des mathématiciens et des informaticiens, qui travaillent sur une définition très précise de ce qu'est un algorithme complexe[173]. Une analyse rapide des publications dans le domaine de l'« *algorithmic complexity* » dans la base de données du *Web of Science* montre que le CNRS, l'Université de Californie, le MIT et Paris Saclay sont les entités de recherche qui publient le plus sur le sujet. Suivent d'autres universités nord-américaines, européennes, asiatiques, russes et australiennes. Plus de 2500 articles et plus de 1800 actes de congrès y sont répertoriés : comme on peut le voir, la communauté est nettement plus petite par rapport à celle dédiée à la complexité computationnelle. *Google Books Ngram Viewer* montre que sa visibilité bibliographique survient entre la fin des années 1980 et le début des années 1990, le nombre de publications restant plutôt stable depuis. En France, les représentants les plus actifs et connus sont Jean-Paul Delahaye[174] et Serge Grigorieff, basés respectivement à l'Université de Lille et au LIAFA de Paris Diderot.
Espaces de rencontre. Des centres de recherche ou des revues entièrement dédiés à cette approche n'existent pas. La communauté de chercheurs et de chercheuses actifs est petite. Ils et elles discutent et se rencontrent dans les départements et les laboratoires de logique, mathématique et informatique, rarement cadrés par des

[168] Blum, M., « A machine-independent theory of the complexity of recursive functions », *Journal of the Association for Computer Machinery*, vol. 14, n. 2, pp. 322–336, 1967.
[169] Cook, S.A., « The complexity of theorem-proving procedures », *Proceedings Third Annual ACM Symposium, Theory of Computing*, 1971.
[170] Levin, L.A., « Универсальные задачи перебора », Проблемы передачи информации, 1973, vol. 9, n. 3, p. 115–116.
[171] Karp, R.M., « Reducibility among combinatorial problems », dans Miller, R.E. & Thatcher, J.W. (ed.), *Complexity of Computer Computations*, New York, Plenum, 1972, pp. 85–103.
[172] Moore, C. & Mertens, S., *The Nature of Computation*, *op. cit.*, p. XV.
[173] Entretiens avec Jean-Paul Delahaye, 02.06.14, 14.01.16 ; entretien avec Serge Grigorieff, 01.12.15.
[174] Delahaye, J.-P., *Complexité aléatoire et complexité organisée*, Paris, Quæ, 2009.

dispositifs institutionnels particuliers. Des colloques exclusivement dédiés à cette branche de l'informatique sont rares[175].

Répertoire conceptuel et technique. La mesure d'une suite binaire d'un objet de Kolmogorov, la mesure de la profondeur logique de Daniel Bennett[176], le théorème d'invariance, le théorème d'incomplétude de Chaitin, la complexité de Lempel-Ziv[177] et bien d'autres outils mathématiques et informatiques font partie de l'ensemble de techniques pour aborder l'étude de la complexité d'un objet mathématique ou d'autre nature.

Définition. Si un ensemble de nombres est exprimable dans une formule courte, on dit que cet ensemble de nombres a une complexité algorithmique faible. Si un ensemble de nombres n'est pas synthétisable par une formule plus courte, on dit que cet ensemble est complexe. En d'autres mots, la complexité de Kolmogorov est une fonction qui permet de quantifier la longueur du plus court programme qui engendre une suite quelconque de caractères. Une suite est aléatoire et présente une complexité maximale quand un programme pour l'exprimer n'existe pas.

Horizon de rétrospection. La complexité algorithmique, qui prend le nom aussi de complexité aléatoire, est surtout le résultat de l'effort du mathématicien russe Andreï Kolmogorov. Il a publié deux articles, l'un en 1963[178] et l'autre en 1965[179], dans lesquels il a proposé une définition algorithmique du hasard. Les informaticiens américains Ray Solomonoff et Grégory Chaitin avaient eu des idées similaires, respectivement en 1960-1964 et en 1965, mais les trois s'ignoraient mutuellement[180]. C'est pour cette raison que la complexité aléatoire ou algorithmique est aussi appelée complexité de Kolmogorov-Solomonoff-Chaitin (ou plus souvent de Kolmogorov-Chaitin[181]). Kolmogorov est toutefois indiqué par la communauté comme celui qui a traité le problème de façon la plus cohérente depuis le début de ses recherches. Ses théorèmes ont influencé la physique, l'informatique et les sciences cognitives.

Projets épistémiques et/ou politiques. Le but de la complexité algorithmique est de fournir une mesure quantitative et précise de la complexité d'un objet. Les scientifiques qui raisonnent sur ces concepts, le font en général pour y trouver des applications en informatique ou en biologie[182].

---

[175] Entretien avec Serge Grigorieff, 01.12.15.

[176] Bennett, C., « Logical Depth and Physical Complexity », dans Herken, R. (ed.), *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, Oxford, Oxford University Press, pp. 227-257.

[177] Lempel, A. & Ziv, J., « *On the Complexity of Finite Sequences* », *IEEE Trans. on Information Theory*, 1976, vol. 22, n. 1, pp. 75–81.

[178] Kolmogorov, A.-N., « On Tables of Random Numbers », *Theoretical Computer Science*, 1963, n. 207, vol. 2, pp. 387-395.

[179] Kolmogorov, A.N., « Three Approaches for Defining the Concept of Information Quantity », *Information Transmission*, vol. 1, 1965, pp. 3-11.

[180] Dahan, A., Chabert, J.-L. & Chemla, K., *Chaos et déterminisme*, Paris, Seuil, 1992, p. 364.

[181] Parce que « Solomonoff a introduit l'idée sans en formuler très proprement la théorie mathématique, ce qui a été fait par Kolmogorov et Chaitin » : entretien avec Jean-Paul Delahaye, 02.06.14.

[182] Delahaye, J.P., *Complexité aléatoire et complexité organisée*, *op. cit.*

La tradition des systèmes complexes adaptatifs (la théorie de la complexité en médecine)

En 2009, un ensemble de médecins et de chercheurs et de chercheuses de plusieurs disciplines, surtout provenant de pays anglophones, se regroupent pour lancer une nouvelle approche dans le domaine de la santé. Leur horizon de rétrospection est composé de deux des traditions que nous avons précédemment décrites.

Représentants. Les deux animateurs de cette tradition sont les médecins et professeurs australiens Joachim Sturmberg et Carmel Martin. Impliqués dans l'écriture d'un ensemble de publications collectives et dans l'organisation d'une série de conférences internationales, ils ont réuni un ensemble de praticiens et de chercheurs et chercheuses provenant de plusieurs pays du monde, notamment des pays anglophones[183].

Ce groupe n'est pas à confondre avec l'approche des SSC transférée dans le domaine de la santé[184]. Celle-ci forme toutefois une partie de l'*horizon de rétrospection* de la tradition impulsée par Sturmberg et Martin[185].

Espaces de rencontre. Ce groupe international et pluridisciplinaire possède ses espaces de rencontre et de dialogue virtuels et physiques dans des publications et des conférences. Pour les publications, cinq éditions du *Forum on Systems and Complexity in Medecine and Healthcare* ont été publiées sous forme d'autant de sections du *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, publié par Wiley. Le projet des organisateurs était d'en faire une section stable de la revue, objectif qui n'a pas été atteint, même si d'autres forums ont été organisés ailleurs sous d'autres noms[186]. Deux livres collectifs ont été également publiés avec Springer[187]. Pour ce qui est des lieux physiques, une conférence annuelle est organisée[188].

Répertoire conceptuel et technique. L'analyse philosophique, les mathématiques des systèmes dynamiques, la recherche narrative et l'évaluation économique sont tout autant des méthodes mises en avant par cette tradition. Le modèle *Cynefin* de Dave Snowden et Cynthia Kurtz est mentionné aussi comme un modèle pour analyser des situations pathologiques[189].

Définition. Les représentants de cette tradition reprennent la définition de la tradition des systèmes dynamiques : ouverts sur l'environnement et auto-organisés, les systèmes complexes se composent de nombreux éléments en interaction non-linéaire et

[183] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., (ed.), *Handbook of Systems and Complexity in Health*, New York, Springer, 2013, pp. XVII-XXI.

[184] Pourbohloula, B. & Kieny, M.-P., « Complex systems analysis : towards holistic approaches to health systems planning and policy », *Bulletin of World Health Organization*, 2011, n. 89, p. 242.

[185] Plsek, P.E., Greenhalgh, T., « Complexity science : The challenge of complexity in health care », *British medical journal*, 2001, vol. 323, pp. 625-628.

[186] Mail de Carmel Martin, 19.10.17.

[187] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., (ed.), *Handbook of Systems and Complexity in Health*, *op. cit.* ; Sturmberg, J.P., (ed.), *The Value of Systems and Complexity Sciences for Healthcare*, Berlin, Springer, 2016.

[188] Notamment : http://systemsandcomplexityinhealthcare.org/agenda/, https://gumc.georgetown.edu/news/Systems-Complexity-Sciences-for-Healthcare et http://systemsandcomplexityinhealthcare.org/.

[189] Kurtz, C.F. & Snowden, D.J., « The new dynamics of strategy: sense-making in a complex and complicated world », 2003, *IBM Systems Journal*, vol. 42, n. 3, pp. 462–483.

récursive[190]. Les représentants de cette tradition utilisent également la définition d'Aristote selon lequel le tout est plus que la somme des parties. Autrement, ils distinguent entre un sens phénoménologique de ce qui est complexe, comme quelque chose de multidimensionnel qui est difficile ou impossible à prévoir, et un sens épistémologique, où la référence à la pensée complexe d'Edgar Morin et aux sciences des systèmes complexes adaptatifs au sens du SFI est explicite.

Horizon de rétrospection. L'*horizon de rétrospection* de ce groupe est double[191]. D'une part, sont cités des auteurs philosophiques, tels qu'Edgar Morin, Paul Cilliers, Isabelle Stengers, Aristote, Platon ; des scientifiques, tels qu'Ilya Prigogine, Stuart Kauffman, Fritjof Capra ; des médecins, tels que Thure von Uexküll, Hannes Pauli, Ian McWhinney ; et des manageurs, tels que David Snowden et Reuben McDaniel[192]. D'autre part, les membres de ce groupe citent la théorie des systèmes complexes adaptatifs issue du SFI, telle qu'elle a été filtrée par l'ingénieur et philosophe Paul Cilliers[193] et par un groupe de chercheurs et de chercheuses en biomédecine[194]. Une certaine référence est faite aussi à des sources plus anciennes, qui, sans utiliser les mots de complexité ou de systèmes complexes, sont décrites comme porteuses d'une approche holiste[195].

Projets épistémiques et/ou politiques. Cette tradition se propose de lancer une nouvelle approche philosophique et scientifique pour comprendre et traiter les processus non-linéaires, complexes et multidimensionnels relatifs aux soins médicaux. Selon les représentants de cette tradition, il faut abandonner l'approche réductionniste de la « science newtonienne » dans la santé pour dépasser les échecs de la méthode analytique, qui sépare les problèmes en morceaux sans voir l'ensemble[196]. Le cadre de la théorie et de la science de la complexité n'est pas mis en avant comme une panacée, il est plutôt décrit comme un cadre mental qui peut permettre, à ceux et celles qui l'emploient, d'aborder la réalité différemment et d'élargir la compréhension de celle-ci[197]. Cette méthode est entendue inspirer et intéresser les chercheurs et chercheuses en médicine, les professionnels du secteur, les planificateurs, les organismes financiers, les administrateurs, les éducateurs dans le domaine de la santé, ainsi que les patients eux-mêmes.

---

[190] Se dit récursif un processus dont les règles s'appliquent plusieurs fois à elles-mêmes.

[191] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., « Complexity and health – yesterday's traditions, tomorrow's future », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 543-548.

[192] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., (ed.) *Handbook of Systems and Complexity in Health*, *op. cit.*

[193] Cilliers, P., *Complexity and postmodernism. Understanding complex systems*, London and New York, Routledge, 1998.

[194] Leykum, L.K., Pugh, J., Lawrence, V., Parchman, M., Noël, P.H., Cornell, J. & Mcdaniel, R.R.J., « Organizational interventions employing principles of complexity science have improved outcomes for patients with type II diabetes », *Implementation Science*, 2007, vol. 2, n. 1, p. 28.

[195] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., (ed.) *Handbook of Systems and Complexity in Health*, *op. cit.*, pp. VII-VIII.

[196] Martin, C.M. & Sturmberg, J.P., « Perturbing ongoing conversations about systems and complexity in health services and systems », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 549-552 ; Miles, A., « Complexity in medicine and healthcare : people and systems, theory and practice », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 409-410.

[197] Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., « Complexity and health », *op. cit.*, p. 544.

La tradition de l'ingénierie des systèmes (la conception et le management des systèmes complexes artificiels)

Une vaste communauté internationale de chercheurs et de chercheuses académiques et privés se reconnait dans l'ingénierie des systèmes telle qu'elle a été lancée au MIT pendant et après la Seconde Guerre mondiale. En France, cette communauté est moins importante et se compose d'un petit nombre d'entrepreneurs et de scientifiques.

Représentants. La principale organisation internationale qui regroupe les académiciens et les industriels inscrits dans cette tradition s'appelle INCOSE : *International Council on Systems Engineering*[198]. Fondée en 1990, elle s'occupe de produire des standards industriels, d'organiser des conférences et de publier des ouvrages. L'INCOSE regroupe plus de 10.000 membres dans le monde, surtout dans les pays anglophones, avec une prédominance nord-américaine. Cette donnée est confirmée par la liste des universités se reconnaissant dans la méthode qui sont listées sur le site du Council of Systems Engineering Universities ou CESUN, groupe informel qui se réunit annuellement pour échanger[199]. L'ingénierie des systèmes se déploie dans des départements mixtes recherche et industrie dans les universités anglaises et américaines, dont l'une des plus connues est la Stevens University à New Jersey[200]. La communauté européenne n'est pas centrale.

Pour citer plusieurs noms notables, Olivier De Weck est professeur d'aéronautique et ingénieur des systèmes au MIT, aussi bien que l'éditeur en chef de la revue officielle de l'INCOSE : *Systems Engineering*[201] ; Patrick Godfrey est professeur d'ingénierie des systèmes à l'Université de Bristol et directeur du *Systems Centre* ; tandis que Daniel Krob, professeur d'ingénierie des systèmes à l'École Polytechnique de Paris, est l'un des rares membres français : il a fondé à Paris CESAMES (Center of Excellence on Systems Architecture, Management, Economy and Strategy), qui est à la fois une association qui organise des conférences[202] et une entreprise privée qui produit et vend des standards pour l'analyse et la construction des systèmes industriels à des multinationales françaises ou étrangères[203]. Sa proposition concerne l'introduction de la sémantique mathématique dans l'ingénierie des systèmes, traditionnellement plus empirique[204].

---

198 Le site officiel de l'INCOSE : http://www.incose.org.

199 Le site officiel du CESUN : http://cesun.org.

200 Le site officiel de l'université dans sa page dédiée à la formation en ingénierie des systèmes : https://www.stevens.edu/school-business/undergraduate-programs/information-systems.

201 Le site officiel du journal : http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291520-6858.

202 Les conférences de CESAMES se tiennent tous les ans à Paris et donnent lieu à la publication des actes : par exemple, Auvray, G., Bocquet, J.-C., Bonjour, E. & Krob, D., *Complex Systems Design & Management. Proceedings of the Sixth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M 2015*, Berlin, Springer, 2016.

203 Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.

204 Mail de Daniel Krob, 13.10.17 ; Krob, D., *CESAM: CESAMES Systems Architecting Method. A Pocket Guide*, Paris, CESAMES Groupe, 2017.

Espaces de rencontre. Les conférences organisées par l'INCOSE, le CESUN ou le CESAMES, les publications scientifiques sous forme de revues ou de livres, les départements et les centres de recherche universitaires, ainsi que les départements de recherche et développement des entreprises sont tout autant des espaces de rencontre de cette communauté internationale, hétérogène et fortement compétitive.

Répertoire conceptuel et technique. Le premier instrument revendiqué par cette tradition est l'humain : la figure de l'architecte de systèmes, selon les membres de cette tradition, devrait être toujours présente dans une firme[205]. Un deuxième ensemble d'instruments inclut les modèles qui visent à déterminer la complexité des projets d'ingénieurs, en calculant le nombre des interfaces ou le temps nécessaire pour les concevoir. La systémique reproche aux méthodes industrielles classiques de procéder par essais et erreurs, perdant ainsi en efficacité productive.

Définition. Pour cette tradition, il est important de distinguer entre le système-réel et le système-modèle, ce dernier étant susceptible de décrire la structure et le comportement du premier[206]. La complexité est une caractéristique attribuée aux modèles, qui sont censés être les plus simples et efficaces possible. Ce courant systémique essaie de fabriquer des modèles d'intégration entre les sous-parties d'un système-modèle.

Horizon de rétrospection. Les travaux de Norbert Wiener sur l'ingénierie des systèmes, ainsi que ceux d'Herbert Simon et d'autres ingénieurs du MIT de l'époque, constituent le noyau de références de cette tradition. En particulier, l'article de Simon, *The architecture of complexity*[207], est identifié comme le texte fondateur de la méthode. L'apport de Ludwig von Bertalanffy est parfois cité, mais il est considéré comme secondaire[208]. Les travaux de Wiener et de l'armée américaine issus du travail de Simon sont restés secrets pendant longtemps (une partie l'est encore). Le manuel d'Andrew Sage, le *Handbook of Systems Engineering and Management*, publié la première fois en 1999, en dévoile une partie[209]. C'est à ce moment-là que le développement du domaine subit un rebond et un exploit[210].

Projets épistémiques et/ou politiques. Pour les membres de cette tradition, il s'agit d'essayer d'avoir des modèles qui puissent gérer l'ensemble des sous-systèmes-modèles, l'objectif ultime étant un modèle systémique hiérarchisé et intégré[211]. Cela pour produire plus efficacement des objets industriels plus fiables. D'un point de vue épistémique, les membres de cette tradition visent à construire une « vraie science des systèmes » ou « systémique », qui soit capable de concevoir et de gérer les systèmes

---

[205] *Ibid.* ; Crawley, E., Cameron, B. & Selva, D., *System Architecture. Strategy and Product Development for Complex Systems*, London, Pearson, 2015.

[206] Berthoz, A. & Petit, J.-L. (dir.), *Complexité-Simplexité*, Nouvelle édition, Paris, Collège de France, 2014 (généré le 20 mars 2014), disponible sur Internet : http://books.openedition.org/cdf/3339, p. 166.

[207] Simon, H., « The Architecture of Complexity », *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106, n. 6, 1962, pp. 467-482.

[208] Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.

[209] Sage, A. (ed.), *Handbook of Systems Engineering and Management*, New York, Wiley, 1999.

[210] Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.

[211] *Ibid.*, p. 167.

complexes artificiels, afin de répondre aux défis de l'humanité et d'en améliorer les sorts[212].

La tradition cognitivo-informationnelle (la complexité intégrative)

Dans les années 1960, un groupe de psychologues a développé, aux États-Unis, une nouvelle approche pour étudier la manière dont les individus utilisent les structures conceptuelles pour s'adapter à des situations données. Pour décrire ces structures, ces chercheurs ont mobilisé la notion de complexité conceptuelle, dans un premier temps, et celle de complexité intégrative ensuite.

Représentants. Les psychologues Harold Schroder, Michael Driver et Siegfried Streufert publient, en 1967, un livre intitulé *Human Information Processing*[213], qui développe des idées contenues dans un livre précédent[214]. Leur objectif était celui de mesurer le traitement de l'information par des individus dans la résolution de problèmes au cœur de situations sociales complexes. En 1971, Schroder et Peter Suedfeld publient un livre collectif, *Personality theory and information processing*, où plusieurs auteurs reviennent sur la théorie de l'information en psychologie depuis des points de vue différents : la complexité intégrative n'est qu'une des approches parmi d'autres[215]. Par une analyse scientométrique par CorTexT sur une base de données issue de *Web of Science*, Suedfeld résulte, depuis lors, l'auteur le plus prolifique parmi ceux qui utilisent la mesure de la complexité intégrative. L'exploit de citations des travaux sur cette approche a lieu entre la fin des années 1980 et le début des années 1990[216], surtout grâce à l'activité de Suedfeld lui-même et de ses étudiants, notamment Philip Tetlock[217]. L'approche de la complexité intégrative est devenue influente dans la psychologie politique, mais elle a également été utilisée en histoire, en économie et dans le journalisme[218].

Le psychologue James Bieri, auteur de la mesure de la « complexité-simplicité cognitive »[219], peut être considéré à ses débuts comme un électron libre (voir plus bas), avec son propre horizon de rétrospection[220], mais il rejoint plus tard le groupe de Schroder et collègues[221].

---

[212] Berthoz, A. & Petit, J.-L. (dir.), *Complexité-Simplexité*, *op. cit.*, p. 163.
[213] Schroder, H., Driver, M. et Streufert, S., *Human Information Processing*, New York, Chicago, San Francisco, Toronto, London, Holt, Rinehart and Winson, 1967.
[214] Harvey, O.J., Hunt, D.E., & Schroder, H.M., *Conceptual systems and personality organization*, New York, Wiley, 1961.
[215] Schroder, H.M. & Suedfeld, P., *Personality theory and information processing*, New York, Ronald, 1971.
[216] Entretien avec Peter Suedfeld, 09.09.15 ; *Google Books Ngram Viewer* confirme la fourchette temporelle indiquée par Suedfeld.
[217] Suedfeld, P., « The cognitive processing of politics and politicians: archival studies of conceptual and integrative complexity », *Journal of personality*, 2010, vol. 78, n. 6, pp. 1669-1702.
[218] Entretien avec Peter Suedfeld, 09.09.15.
[219] Bieri, J., « Cognitive complexity-simplicity and predictive behavior », *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 1955, n. 51, pp. 263-268.
[220] Kelly, G.A., *The psychology of personal constructs*, New York, Norton, 1955.
[221] Schroder, H.M. & Suedfeld, P., *Personality theory and information processing*, *op. cit.*, pp. 178-208.

Espaces de rencontre. L'approche de la complexité intégrative est une théorie académique, développée par des universitaires dans des départements de psychologie. Aucune structure institutionnelle ou informelle alternative n'a pas été créée. Nous mentionnerons donc l'Université de Princeton, où le groupe initial de Schroder, Driver, Streufert et Suedfeld avait été actif, ainsi que l'Université de la Columbia Britannique, à laquelle est rattaché Suedfeld.

Répertoire conceptuel et technique. Cette mesure considère la façon dont les personnes pensent, plus que ce qu'elles pensent : cette distinction entre la structure (croyances, hypothèses, attitudes, besoins, concepts) et le contenu ne va pas sans rappeler la distinction analogue faite par Shannon et Weaver dans la théorie de l'information. Ceux-ci considéraient de manière séparée la quantification de l'information dans une télécommunication et son sens, sur lequel leur théorie n'a rien à dire. Les principaux outils techniques pour mesurer la complexité intégrative sont le « *paragraph completion test* », le test de formation des impressions et l'analyse de toute typologie de texte écrit (méthode appliquée notamment dans l'étude de la psychologie des leaders politiques disparus ou impossibles à étudier directement).

Définition. La mesure de la complexité intégrative se compose de deux éléments : 1) le « degré de différentiation » indique la perception des plusieurs dimensions ou parts impliquées dans une situation cognitive, 2) le « degré d'intégration » indique les connexions cognitives ou les règles d'intégration entre les différentes dimensions.

Horizon de rétrospection. Le contexte intellectuel de cette tradition repose sur ce qui a été appelé la « révolution cognitive »[222]. Le paradigme behavioriste stimulus-réponse, dominant les sciences de l'esprit depuis le début du XX^{ème} siècle, laisse à partir des années 1960 la place à des approches tournées vers la cognition, entendue comme un processus de traitement de l'information. L'*horizon de rétrospection* commun aux chercheurs utilisant la complexité intégrative se compose concrètement des premiers travaux informationnels en psychologie, notamment le « *General Problem Solver* » de Newel, Shaw et Simon[223], le « *Perceptron* » de Rosenblatt[224], les réseaux de neurones artificiels de Donald Hebb[225] et le modèle de la personnalité autoritaire d'Adorno, Frenkel-Brunswik, Levinson et Sanford[226]. La cybernétique, la théorie de l'information et la systémique constituent des influences ultérieures.

Projets épistémiques et/ou politiques. Comprendre la manière dont l'information est utilisée par les individus afin de s'adapter à une situation. Catégoriser et prédire le

[222] Gardner, H., *Histoire de la révolution cognitive*, Paris, Payot, 1993.
[223] Newell, A., Shaw, J.C., & Simon, H.A., « Elements of a theory of human problem solving », *Psychological review*, 1958, n. 65, pp. 151-166.
[224] Rosenblatt, F., « The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain », *Psychological review*, 1958, n. 65, pp. 386-408.
[225] Hebb, D.O., « Drives and the conceptual nervous system », *Psychological review*, 1955, n. 62, pp. 243-254.
[226] Adorno, T.W., Frenkel-Brunswik, E., Levinson, D.J., & Sanford, R.N., *The authoritarian personality*, New York, Harper & Row, 1950. Pour davantage de littérature pionnière, cf. Schroder, H.M. & Suedfeld, P., *Personality theory and information processing*, *op. cit.*, pp. 3-6.

comportement des individus, pour aider les pouvoirs publics ou le management à la prise de décision.

Sur les individus à cheval entre plusieurs traditions

L'identification des sept traditions que nous venons de décrire n'implique évidemment pas une vision étanche et mécanique de ces groupes. Les frontières sont parfois plus floues que ce que notre analyse peut suggérer. Cette section essaie de rendre compte, bien que de façon anecdotique, de quelques exemples qui mettent à mal une vision imperméable des traditions les unes par rapport aux autres. Nombreux sont en effet les personnages se trouvant à cheval entre deux ou plusieurs traditions. En voici quelques exemples :

- Le médecin, biologiste et entrepreneur Stuart Kauffman se considère comme un disciple de Warren McCulloch, membre de la première cybernétique, et il est à la fois l'un des chercheurs les plus actifs des débuts de la vie institutionnelle du SFI[227].
- Francisco Varela, biologiste, philosophe et cybernéticien de second ordre, a collaboré avec Christopher Langton du SFI, où il a séjourné comme visiteur plusieurs fois[228]. Avec Paul Bourgine, fondateur de l'ISC-PIF, Varela a contribué au domaine de la vie artificielle.
- Serge Grigorieff, représentant de la complexité algorithmique en France, a travaillé tant sur les théories de Kolmogorov que sur les automates cellulaires de Stephen Wolfram, mathématicien britannique rentré tôt dans l'orbite du SFI et lui-même fondateur d'un centre de systèmes complexes[229] et d'un journal sur le domaine[230].
- Henri Atlan, que nous avons inscrit dans la tradition cybersystémique française, a utilisé l'article de Kolmogorov pour essayer de produire, avec le mathématicien israélien Moshe Koppel, une version applicable aux organismes vivants[231]. En même temps il a travaillé sur les réseaux booléens de Stuart Kauffman, en collaborant avec Gérard Weisbuch et Françoise Fogelman au sein du Laboratoire de Dynamique des Réseaux de Paris.

[227] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 11.
[228] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 19.
[229] Le *Center for Complex Systems Research*, rattaché à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign. Il existe encore aujourd'hui, voici son site officiel : https://dsweb.siam.org/The-Magazine/All-Issues/center-for-complex-systems-research-at-uiuc.
[230] Le journal *Complex Systems*, fondé en 1987 par Wolfram, existe encore et est toujours dirigé par l'entrepreneur anglais. Site officiel du journal : http://www.complex-systems.com/.
[231] Koppel, M. & Atlan, H., « An Almost Machine-Independent Theory of Program-length Complexity, Sophistication and Induction », *Information Science*, n. 56, 1991, pp. 23-33.

- Joël de Rosnay, ancien membre du Groupe des Dix, a écrit un livre où il marie la tradition cybersystémique avec celle des systèmes dynamiques issue du SFI[232].
- En 1989 le physicien polonais de Los Alamos, Wojciech Zurek, donne un workshop sur la complexité algorithmique au SFI pour essayer de trouver un moyen de quantifier la complexité qui puisse être utile aux autres recherches menées par l'institut[233].
- Jean-Paul Delahaye, mathématicien français travaillant sur la complexité algorithmique, a été inclus en 2009 dans le comité scientifique pour rédiger la Feuille de route du RNSC, foyer des SSC en France[234].
- Des rapports d'amitié et d'échange intellectuel existent entre Daniel Krob, représentant français de l'ingénierie des systèmes, et Michel Morvan, physicien et entrepreneur français, aujourd'hui installé à San Francisco, qui s'efforce de porter les SSC dans le monde des entreprises[235].
- L'informaticien Cristopher Moore, chercheur actif dans le domaine de la complexité computationnelle, est l'un des membres à temps plein du SFI.
- En 1991, le SFI affiche un appel à articles du *Principia Cybernetica Project*, dont l'un des membres est le cybernéticien Gordon Pask[236].

Si ces exemples (dont on pourrait allonger la liste) montrent que les frontières entre les traditions ne sont pas étanches, de tels croisements n'invalident pas pour autant nos regroupements. Ils confirment *a contrario* que des bornes socio-épistémiques existent, étant précisément rendues visibles quand elles sont franchies.

Les électrons libres

Une catégorie à part comprend ceux et celles que nous proposons d'appeler des « électrons libres », car ils ou elles utilisent le concept de complexité de manière plus ou moins systématique, sans pour autant faire partie d'aucune tradition et sans forcément vouloir/réussir à créer des écoles.

Le mathématicien américain Warren Weaver écrit en 1948 un article sur la complexité désorganisée et la complexité organisée[237]. La première se réfère aux phénomènes chaotiques de type météorologique, la deuxième aux phénomènes organisés mais hautement imbriqués tels que la vie ou les sociétés humaines. Si la sophistication des équations physiques peut, selon Weaver, aider à saisir la première classe de

[232] Rosnay, J. de, *L'homme symbiotique*, Paris, Seuil, 1995.
[233] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 15 ; mais aussi Waldrop, M.M., *Complexity*, *op. cit.*, p. 248.
[234] Bourgine, P., Chavalarias, D. & Perrier, E., *French Roadmap*, *op. cit.*, p. 24.
[235] Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.
[236] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 20.
[237] Weaver, W., « Science and Complexity », *op. cit.*, pp. 536-544.

phénomènes, des nouveaux outils devaient être inventés pour aborder la deuxième classe. Parfois cité dans la tradition cybersystémique française et dans le domaine des SSC, cet article ne se référait à aucun *horizon de rétrospection* ni il a généré de traditions à proprement parler.

En 1988, l'archéologue américain Joseph Tainter publie un livre, devenu célèbre, sur l'effondrement (collapse) des sociétés complexes[238]. Interrogé sur l'origine du terme, Tainter dit l'utiliser dans le « sens commun » selon lui présent dans les sciences sociales américaines et issu des travaux de Durkheim[239]. Il a été plusieurs fois invité au SFI[240] mais il dit de ne pas avoir entamé des collaborations avec aucun des membres de ce centre.

Pour citer un autre exemple, le philosophe des sciences italien et ex-postdoctorant du CREA Fausto Fraisopi a publié des ouvrages sur la philosophie de la complexité, pour l'inscrire dans un discours de « fondation » ou de « fixation ontologique » par le biais d'une étude phénoménologique de la connaissance et de la modélisation de la complexité[241]. Travaillant sur et avec la *tradition cybersystémique* et celle *des systèmes dynamiques*, dans son livre *La complexité et les phénomènes* Fraisopi mobilise un *horizon de rétrospection* composé essentiellement de trois textes philosophiques sur la complexité, indépendants les uns des autres[242].

Pour finir, nous donnerons un exemple provenant des sciences sociales : un groupe de sociologues de sciences s'est fédéré une seule fois autour du titre de *Complexities*, livre publié en 2002[243]. L'objectif de ce collectif n'étant pas celui de fonder une nouvelle théorie de la complexité ni de développer un courant existant, ces chercheurs et chercheuses se sont attelés à traiter la « révolte » qu'il y aurait eu, à leur avis, dans les travaux récents en histoire, sociologie, anthropologie et philosophie des sciences et des techniques (surtout le champ STS) contre une certaine simplification des récits. Mené par des instances diverses (médias, sciences, politique, entreprises), le discours simplificateur – qui divise, exclue et réduit la complexité de la réalité sociotechnique – a le défaut de générer, selon les auteurs de ce livre, des prises de décisions pour l'action qui sont au mieux inutiles, au pire dangereuses. Il s'agit d'un usage isolé du concept de complexité en sociologie des sciences, d'un éloge d'une attitude intellectuelle qui reconnaisse les complexités du monde sociotechnique ; il ne s'agit pas d'un acte fondateur d'un nouveau domaine de recherche ou d'un nouveau courant théorique.

---

[238] Tainter, J., *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.

[239] Mail de Joseph Tainter, 24.03.15.

[240] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 10.

[241] Par exemple, Fraisopi, F., *La complexité et les phénomènes. Nouvelles ouvertures entre science et philosophie*, Paris, Hermann, 2012.

[242] Bailly, F. & Longo, G., *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*, Paris, Hermann, 2008 ; Morin, E., *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Seuil, 1990 ; Hooker, C. (ed.), *Philosophy of Complex Systems*, *op. cit.*

[243] Law, J. & Mo, A. (ed.), *Complexities. Social studies of knowledge practices*, Durhamn & London, Duke University Press, 2002.

Autres notions de complexité

Si la métaphore des électrons libres sert à nous référer à des individus relativement isolés, nous abordons maintenant une série d'interprétations qui sont, quant à elles, partagées par des collectifs parfois très vastes. Il existe en effet un grand nombre d'autres notions de complexité, qui ne nous paraissent pas avoir les caractéristiques d'une tradition. Il s'agit d'un ensemble de notions qui ne fédèrent pas autour d'elles des communautés fortement intégrées et qui peuvent impliquer des groupes composés d'un nombre considérable de représentants peu soudés entre eux. Ou alors il s'agit d'emplois de « complexe » ou de « complexité » pour lesquels nous n'avons pas suffisamment de données pour établir s'il s'agit bien de traditions dans le sens établi plus haut. L'exhaustivité étant difficilement à atteindre pour ce qui est des *traditions* des théories de la complexité, elle est encore plus hors de portée si l'on entend répertorier la totalité des notions de complexité en mathématique[244], en sciences de l'ingénieur, en informatique, en SHS, etc. Nous citerons quelques cas à titre d'exemple :

- En médecine, surtout dans le monde anglophone, depuis la fin des années 1990 l'on parle d'« interventions complexes »[245]. Elles sont définies comme des interventions non-pharmacologiques, comportementales, construites à partir d'un ensemble d'éléments hétérogènes, qui peuvent agir de façon interconnectée ou indépendante[246].

[244] Par exemple : Allouche, J.-P., « Surveying some notions of complexity for finite and infinite sequences », dans Matsumoto, K., Akiyama, S., Fukuyama, K., Nakada, H., Sugita, H., Tamagawa, A., (ed.), *Functions in Number Theory and Their Probabilistic Aspects*, Kyoto, 2010, Kôkyûroku Bessatsu Series, RIMS, Kyoto University, vol. B34 (2012), pp. 27-38 ; ou Allouche, J.-P. & Lestocart, L.-J., « Peut-on mesurer la complexité ? », dans Lestocart, L.-J. (ed.), *Esthétique de la complexité. Pour un cognitivisme non-linéaire*, Hermann, 2017, pp. 331-346.

[245] Entretien avec Alain Leplège, 08.01.16 ; Shiell, A., Hawe, P., Gold, L., « Complex interventions or complex systems ? Implications for health economic evaluation », *British Medical journal*, 2008, vol. 336, n. 1281 ; Medical Research Council, *A Framework for Development and Evaluation of RCTs for Complex Interventions to Improve Health*, London, Medical Research Council, 2000 ; Craig, P., Dieppe, P., Macintyre, S., Michie, S., Nazareth, I., & Petticrew, M., « Developing and evaluating complex interventions : the new Medical Research Council guidance », *British Medical Journal*, 2008, 337 ; Byrne, M., Cupples, M.E., Smith, S.M., Leathem, C., Corrigan, M., « Development of a complex intervention for secondary prevention of coronary heart disease in primary care using the UK Medical Research Council framework », *The American Journal of Managed Care*, 2006, n. 12, pp. 261-266 ; Richards, D.A. & Hallberg, I.R., *Complex interventions in health. An overview of research methods*, London and New York, Routledge, 2015.

[246] Les interventions peuvent prendre la forme de formations pour le personnel sanitaire, de dispositifs de prévention auprès des patients et de mises en place concrètes de lignes-guide dans des organismes normatifs. Elles ont pour but d'améliorer le niveau de santé d'une population ou l'efficience économique du système sanitaire d'un pays. La complexité est ici entendue relativement au champ des possibles issues des interventions, ou relativement à la variabilité de la population-cible, plus qu'avec le nombre d'éléments présents dans le paquet de l'intervention lui-même (Medical Research Council, *Developing and evaluating complex interventions : new guidance*, London, Medical Research Council, 2006). Il existe de travaux qui comparent la méthode des interventions complexes avec la notion de complexité des SSC (Shiell, A. et al., « Complex interventions or complex systems ? », *op. cit.*, n. 1281) et d'autres qui proposent un rapprochement entre les deux (Hawe, P.,

- Toujours dans le champ médical, en particulier dans celui de l'identification des pathologies psychiatriques et physiologiques, « INTERMED »[247] est le nom d'un type d'intervention complexe, notamment un instrument pour l'identification de la complexité pathologique d'un patient. Il s'agit d'une méthode qui vise à mener un soin interdisciplinaire et à accorder les besoins des patients complexes avec les ressources du système sanitaire.
- Dans des articles[248], aussi bien que dans un livre de philosophie de la biologie resté non-publié[249], écrits avec des collaborateurs, l'écologue américain Timothy Allen propose des récits (*narratives*) des systèmes complexes. Ceux-ci se veulent capables de saisir non seulement l'émergence, considérée comme la manifestation de lois thermodynamiques simples, mais aussi leur structure et leur niveau sémantique[250]. En se référant à la systémique et aux travaux du SFI, Allen se pose surtout en tant que disciple du biologiste théoricien américain Robert Rosen, qui a parlé de « biologie des systèmes complexes » pour se référer à une approche biomathématique visant à étudier la définition de la vie[251]. Rosen est entré en contact avec le SFI, mais il se voyait surtout comme un systémicien, ayant dirigé la Society for General Systems Research (maintenant International Society for Systems Science). La communauté dont il a fait partie[252], en tant que disciple et en tant que pionnier, est probablement trop petite et hétérogène pour qu'on puisse la considérer comme une tradition des théories de la complexité.
- En mathématique, l'on parle d'« analyse complexe » ou de « théorie des fonctions d'une variable complexe » pour la branche de l'analyse mathématique qui travaille sur les nombres complexes dans des plans complexes[253]. Appliquée, entre autres, en géométrie algébrique, en analyse combinatoire, en hydrodynamique, en mécanique quantique ou dans l'analyse des fractales, elle a

---

Shiell, A. & Riley, T., « Complex interventions : how 'out of control' can a randomised controlled trial be? », *British Medical journal*, 2004, vol. 328, n. 7455, pp. 1561-1563).

[247] Jonge, P. de, Huyse, F.J., Stiefel, F.C., Slaets, J.P., Gans, R.O., « INTERMED–a clinical instrument for biopsychosocial assessment », *Psychosomatics*, 2001, vol. 42, n. 2, pp. 106-109 ; Huyse, F.J., Stiefel, F.C., de Jonge, P., « Identifiers, or 'red flags,' of complexity and need for integrated care », *Medical Clinics of North America*, 2006, vol. 90, n. 4, pp. 703-712 ; le site officiel du consortium hollandais de l'instrument : http://www.intermedconsortium.com.

[248] Zellmer, A.J., Allen, T.F.H. & Kesseboehmer, K., « The nature of ecological complexity : A protocol for building the narrative », *Ecological Complexity*, 2006, n. 3, pp. 171-182.

[249] Allen, T.F.H., Giampietro, M. & Zellmer, A.J., *The two faces of complexity*, non-publié.

[250] Ces récits représenteraient le premier pas avant de parvenir à des modèles mathématiques et à des paradigmes, la complexité étant un problème d'interprétation pour le scientifique démuni d'instruments pour saisir le phénomène en étude.

[251] Rosen, R., *Essays on Life Itself*, New York, Columbia University Press, 2000.

[252] Baianu, I.C., « Robert Rosen's Work and Complex Systems Biology », *Axiomathes*, 2006, vol. 16, n. 1-2, pp. 25-34.

[253] Silverman, R., *Complex Analysis with Applications*, New York, Dover Publications, 1974 ; Stein, E.M. & Shakarchi, R., *Complex Analysis*, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2003.

été développée par Euler, Gauss, Riemann, Cauchy au XVIII et XIX^{ème} siècles, et par bien d'autres mathématiciens du XX^{ème} siècle.

- Pour rester dans les mathématiques, l'on parle aussi de « complexité combinatoire » pour faire référence à des mesures plus spécifiques de la complexité des mots[254].
- En informatique, on parle de « complexité cyclomatique » pour désigner une unité de mesure quantitative pour la complexité d'un programme dans un logiciel[255], mais aussi de « complexité de la communication » pour mesurer, dans le domaine du calcul distribué, les ressources en communication qui sont nécessaires dans l'accomplissement de certaines tâches[256].

Conclusion

Face au magma indistinct que nous paraissait constituer au début de nos recherches le non-domaine des théories de la complexité, cette division en traditions a le mérite de permettre de s'y orienter, tout en étant empiriquement défendable. Après avoir déconstruit l'idée d'une unité d'un domaine qui n'en est pas un, l'objectif principal de ce Prologue était de fournir des points de repère pour circuler parmi les différentes notions de complexité existantes : notre liste est certainement incomplète, mais l'exhaustivité absolue n'était pas une *conditio sine qua non* pour l'achèvement de notre travail. Une deuxième finalité a été celle de mettre à l'œuvre des concepts analytiques qui semblent plus pertinents que ceux qui sont couramment utilisés (paradigme, champ, discipline, etc.) pour aborder des groupes socio-épistémiques hétérogènes. Nous n'ignorons pas que le terme de *tradition* peut parfois sembler inapproprié, à la lumière du fait que souvent les « lignages » se font à distance, par le biais de la littérature, et non pas à travers une rencontre directe entre des maîtres et des disciples. Nous l'avons tout de même choisi 1) car c'est un terme plus spécifique que les termes vagues de « groupe », de « famille » ou de « nébuleuse » ; 2) il souligne les continuités dans la durée, sans nier les changements et les ruptures ; et enfin, 3) il nous a semblé moins inapproprié que celui de paradigme, de discipline ou de champ pour rassembler, dans une même analyse, des entités si différentes que peuvent l'être, par exemple, un courant de pensée (i.e. la *tradition cybersystémique* française), une soi-disant nouvelle discipline (i.e. les *sciences de la complexité*) ou une unité de mesure qui est à la fois un domaine de recherche (i.e. la complexité algorithmique). Pour conclure, nous pensons que les recherches sociohistoriques futures sur les théories de

[254] Allouche, J.-P., Baake, M., Cassaigne, J. & Damanik, D., « Palindromic complexity », *Theoretical Computer Science*, vol. 292, n. 1, 2003, pp. 9-31.
[255] McCabe, T.J., « A Complexity Measure », *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1976, vol. 2, n. 4, pp. 308–320.
[256] Yao, A.C., « Some Complexity Questions Related to Distributed Computing », *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on Theory of Computing STOC*, 1979, n. 14, pp. 209–213.

la complexité devraient tenir compte des frontières et des coïncidences de termes entre groupes sociaux différents, tout en sachant que le tableau des sept *traditions*, en tant que point de départ, est incomplet et amendable.

Acte 1 – L’ordinateur et l’interdisciplinarité

Introduction à l'Acte 1

L'idée selon laquelle l'ordinateur serait un facilitateur du travail scientifique interdisciplinaire est tellement répandue qu'elle est devenue banale. Dans l'Introduction générale nous avons cité le cas de Michael Gibbons et ses collègues qui, dans *The new production of knowledge*, lient fortement l'essor des technologies informatiques au « Mode 2 » de fonctionnement de la science, qui est, selon eux, interdisciplinaire et transdisciplinaire. Ce groupe de sociologues ne font que cristalliser une position affirmée par de nombreux auteurs. On pourra citer Peter Galison, qui voit dans l'ordinateur le noyau des *trading zones*, c'est-à-dire de ces espaces d'échanges entre cultures scientifiques différentes[257]. Dans la quatrième de couverture d'un livre d'épistémologie critique des modèles, écrit par le philosophe Nicolas Bouleau, on lit :

> « Des sciences de la matière à la sociologie en passant par l'environnement et l'économie, la modélisation est devenue, grâce à l'informatique, le mode d'expression le mieux adapté à la préparation des projets et à la décision collective sous toutes ses formes, parce qu'elle met en œuvre naturellement l'interdisciplinarité indispensable aux problèmes complexes »[258].

L'*Oxford Handbook of Interdisciplinarity* revient plusieurs fois sur le rôle de l'ordinateur dans l'accélération du travail interdisciplinaire dans plusieurs domaines des savoirs et des techniques[259]. L'ouvrage dirigé par la géographe Nicole Mathieu et la philosophe Anne-Françoise Schmid[260], *Modélisation et interdisciplinarité*, vise à bien distinguer les pratiques de la modélisation de celles de l'interdisciplinarité car, selon les éditrices, elles sont trop souvent assimilées, alors qu'il faudrait en étudier les articulations d'un point de vue épistémologique. Le géographe et représentant des SSC Arnaud Banos considère que « le modèle [numérique] peut devenir un formidable médiateur, voire même un catalyseur de collaborations disciplinaires et interdisciplinaires »[261]. Pour l'agronome Dominique Hervé et le statisticien Francis Laloë, la modélisation implique la complexité, et celle-ci implique l'interdisciplinarité[262]. Les philosophes Johannes Lenhard et Günter Küppers et le

---

[257] Galison, P., *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago, London, The University of Chicago Press, 1997.
[258] Bouleau, N., *La modélisation critique*, Versailles, Éditions Quæ, 2014.
[259] Frodeman, R., Thompson Klein, J., Mitcham, C. & Holbrook, J.B. (ed.), *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, Oxford, Oxford University Press, 2010.
[260] Mathieu, N. & Schmid, A.-F. (ed.), *Modélisation et interdisciplinarité. Six disciplines en quête d'épistémologie*, Versailles, Quæ, 2014.
[261] Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre. Itinéraire d'un géographe*, Paris, Éditions Matériologiques, 2016, p. 77.
[262] « Parler de modélisation, c'est sans conteste parler de complexité. Mais parler de complexité, est-ce nécessairement parler d'interdisciplinarité ? Vraisemblablement. La question mérite néanmoins d'être posée » :

sociologue Terry Shinn ont édité un livre collectif sur la simulation numérique, dans lequel ils y décrivent les rapports interdisciplinaires qui prennent appui sur l'ordinateur en permettant un mouvement d'aller-retour constant pour discuter et rediscuter les méthodes, les modèles et les perspectives :

> « Practictioners are engaged in a continuous re-embedding and reverse-flow re-embedding of methods, models, and perspectives in the course of movement back and forth between specific applications and involvement with simulation as a generic instrument. During re-embedding, the hub concepts expressed in a generic device, methodology, protocol, or language are transferred outward, and are adapted for adoption in a particular local environment with specific technical requirements »[263].

Dans l'idée de l'adaptation des méthodes computationnelles aux contextes disciplinaires il y a l'impression d'une symétrie culturelle entre les parties prenantes. À quoi s'ajoute une affirmation concernant le rôle de l'ordinateur dans le changement observé dans la science, la culture et la société : « Computer simulation has caused many aspects of science, culture, and society to change »[264].
Le pouvoir interdisciplinaire de l'ordinateur est une idée soutenue, on peut s'en douter, par les représentants des SSC aussi :

> « The primary research instrument of the sciences of complexity is the computer. It is altering the architectonic of the sciences and the picture we have of material reality. […] The computer, with its ability to manage enormous amounts of data and to simulate reality, provides a new window on that view of nature. We may begin to see reality differently simply because the computer produces knowledge differently from the traditional analytic instruments. It provides a different angle on reality »[265].

Des auteurs français reprennent même la notion de Galison des *zones de transaction* pour illustrer le rôle de l'ordinateur dans l'interdisciplinarité :

> « The computer is important for advancing the understanding of complex systems because it allows scientists to play with simple, but nonlinear models, and to handle large sets of data obtained from complex systems. At a more local level – specifically the interdisciplinary level – trading zones allow for coordination between vastly different scientific cultures, which differ in their conception of an

---

Hervé, D. & Laloë, F., *Modélisation de l'environnement : entre natures et sociétés*, Versailles, Éditions Quæ, 2009, p. 9.
[263] Lenhard, J. et al., *op. cit.*, p. 17.
[264] *Ibid.*, p. 20.
[265] Pagels, H.R., *The Dreams of Reason*, *op. cit.*, p. 13.

interesting topic, but can nonetheless work together around specific tools (a DNA microchip) or concepts (a network) »[266].

Le sociologue anglais John Urry a dirigé en 2006 un numéro spécial de *Theory, Culture & Society* dédié à la complexité et aux implications des SSC pour les SHS. Il y a soutenu que ce domaine peut permettre le dépassement des frontières entre nature et culture, ainsi qu'entre sciences naturelles et sciences humaines : « The complexity sciences seem to provide the means to overcome such divisions between nature *and* society and between the natural/physical sciences *and* the social sciences »[267].
Le problème avec ces idées très répandues réside moins dans les naturalisations qu'elles banalisent que dans l'invisibilisation des rapports de force scientifiques et institutionnels qu'elles accomplissent. Le terrain des SSC, qui est interdisciplinaire au plus haut degré parce que pratiquement toutes les sciences naturelles et humaines y sont convoquées, montre bien que l'ordinateur est effectivement le médiateur de dialogues transculturels, mais que cela ne se fait pas sur fond d'égalité. Ces collaborations interdisciplinaires sont traversées par des rapports de domination ou par des asymétries importantes. Les sciences convoquées ne contribuent pas toutes de la même manière, ni en termes sociaux, ni en termes théoriques, ni en termes techniques, ni en termes ontologiques. Ces asymétries de prise ne sont pas toujours conflictuelles, parfois se faisant de commun accord. Mais elles ne sont pas moins le signe d'une participation inégale des différentes cultures épistémiques en présence. Dans les SSC, les disciplines de la physique, de l'informatique et des mathématiques sont celles qui dictent les régimes épistémiques et les visions du monde, qui fournissent les instruments et les techniques à tous les autres membres du collectif. Ce sont elles qui définissent le cadre de la collaboration avec les autres disciplines, lesquelles assument plutôt le rôle de fournisseurs de problèmes, tandis que la triade citée ci-dessus représente le pôle à même de pouvoir et de devoir résoudre les problèmes des autres.
Dans le Prologue, nous avons qualifié les SSC comme étant l'une des *traditions des systèmes dynamiques*. Dans la suite, nous allons nous concentrer sur cet courant en particulier, pour plusieurs raisons : de toutes les *traditions* que nous avons repérées, celle-ci est celle qui a le plus d'histoire, celle dont les promesses sont les plus ambitieuses, mais c'est aussi celle qui a obtenu le plus de financements publics et privés, tout en étant la plus active dans le domaine entrepreneurial.
Nous avons tâché de suivre des chercheurs et des chercheuses qui se réclament, d'une manière ou d'une autre, des SSC avec des finalités épistémiques, institutionnelles ou financières différentes. Pour ne pas se disperser, la porte d'entrée choisie passe par les institutions. Le risque est quand même d'essentialiser un espace physique et social, si l'on ne prend pas garde à faire deux mouvements : le premier consiste à prendre en

[266] Grauwin, S. et al., « Complex Systems Science », *op. cit.*
[267] Urry, J., « Complexity », *op. cit.*

compte l'institution comme un point de rencontre, une sorte de base physique et intellectuelle, à travers laquelle retracer des espaces et des parcours qui dépassent la localisation spécifique liée à des murs concrets ; le deuxième mouvement consiste à ajouter à nos deux terrains institutionnels étatsunien et français d'autres centres se réclamant des SSC. Si le choix du Santa Fe Institute est assez évident, le choix de la communauté française repose sur le fait qu'il s'agit d'une des plus étendue au monde. Elle est aussi la plus active en Europe et ses entrepreneurs scientifiques le font savoir : « le réseau national des systèmes complexes, écrivent-ils dans un statut, pourrait être l'interlocuteur unique pour la France pour la création de l'Espace européen de recherche (European Research Area – E.R.A.) sur les systèmes complexes »[268].

Le présent Acte se compose de quatre chapitres et deux apartés. Le premier chapitre aborde le projet épistémique des SSC : on verra que, si la visée interdisciplinaire des fondateurs de ce domaine est claire et présente dès le début, y compris et surtout en direction des SHS, elle s'ancre autour de trois disciplines à la source à la fois des méthodes d'analyse et des visions onto-épistémologiques des sciences de la complexité. La physique, l'informatique et les mathématiques sont ainsi investies d'une mission bien identifiée : rendre plus scientifiques, par le biais de la quantification et de la formalisation mathématique et computationnelle, toutes les autres sciences naturelles et sociales.

Après ce premier panorama, dressé à partir des archives et des extraits d'entretien des fondateurs du SFI et de l'ISC-PIF, nous relaterons l'histoire de la fondation de l'institut américain. Nous y décrirons la manière dont la « science de la complexité », pour citer la formule employée par ses créateurs, est venue se constituer comme une science computationnelle.

Suite à ce chapitre historique, nous avons dédié un aparté[269] à la manière dont le SFI s'inscrit dans le contexte socio-économique américain depuis sa fondation à aujourd'hui. Il s'agira de voir quelles typologies de collecte de fonds, de gestion de l'institution et de discours idéologiques l'institut américain a mis en place au cours des années. Cela sera l'occasion pour nous de proposer notre hypothèse de lecture sur les raisons qui ont mené les fondateurs du SFI à lancer un nouveau domaine technoscientifique.

Les trois chapitres qui suivent examinent la situation française. D'abord, il s'agira de raconter l'histoire de la fermeture du Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) de l'École Polytechnique, première institution française où il est question, dès les années 1980, de complexité et de sciences cognitives. Ce laboratoire s'est posé l'objectif de mener des études explicitement interdisciplinaires, couplant les

[268] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 11.

[269] Un aparté est une réplique de théâtre prononcée par un personnage qui ne s'adresse qu'au public et que les autres personnages n'entendent pas. Cette rupture du quatrième mur sert à mettre au jour le ressenti et les pensées personnelles d'un personnage. Nous l'employons métaphoriquement pour les chapitres qui ne répondent pas à la problématique de l'Acte dans lequel ils sont contenus.

SHS aux sciences naturelles de manières inédites jusqu'alors en France. Fondé en 1982, le CREA fermera en 2012 du fait d'une série de conflits à la fois épistémiques, idéologiques et institutionnels.

L'histoire du CREA, intéressante en soi et pour mettre en lumière les tensions qui existent entre SSC et SHS, est indispensable afin de comprendre la fondation en France du domaine lancé par le SFI. C'est en s'appuyant sur l'institution de l'École Polytechnique que les entrepreneurs scientifiques français ont réussi à fonder l'ISC-PIF en tant que partie du Réseau National des Systèmes Complexes, organisme financé par le CNRS. Nous verrons que cet institut aura non seulement survécu au CREA mais aussi contribué à en produire la disparition. À l'aune du modèle représenté par le SFI, l'institut francilien de la complexité contient uniquement des ordinateurs et son corps de chercheurs se compose principalement d'informaticiens et de physiciens. Plus encore que son homologue américain, l'ISC-PIF s'est penché sur les SHS pour une raison, là aussi, contingente.

Conclut cet Acte 1 un deuxième aparté dédié, de façon spéculaire au premier, à la manière dont l'institut francilien de la complexité s'inscrit dans le contexte socio-économique français. Tandis que le SFI s'inscrivait dans la nouvelle vague de néolibéralisme reaganien initiée dans les années 1980, les informaticiens et polytechniciens de l'ISC-PIF militent pour des plateformes numériques *open source* dans un cadre libéral de gauche.

Chapitre 2 – Le projet épistémique des SSC

Introduction

Est-ce que l'ordinateur facilite, voire implique le travail interdisciplinaire ? Pour répondre à cette question générale, nous devons poser une question particulière à notre objet d'étude : quel est le projet épistémique des SSC ? D'abord, nous savons qu'il s'agit d'un domaine défini dès le départ comme pluridisciplinaire et interdisciplinaire, afin de concevoir des espaces aptes à encourager le dialogue entre scientifiques de disciplines différentes (voir chapitre 10). Cet élément constitutif mais non pas distinctif des SSC est à la fois épistémique (croisement de connaissances) et social (modes spécifiques d'organisation du travail scientifique). Mais dans l'interdisciplinarité il y a par définition une multiplicité de voix. La deuxième chose que nous savons c'est que le domaine se caractérise par son approche computationnelle. Les instituts de la complexité, depuis le SFI, n'ont pas de laboratoires de sciences naturelles, l'on n'y trouve pas de paillasses, de machines, d'animaux, de pipettes, etc. Les ordinateurs et les grilles de calcul sont les seuls outils de travail que l'on rencontre dans ces centres de recherche.

Cela conduit à une question plus précise : comment une entité sociale plurielle et soi-disant pluraliste peut arriver à une unité identitaire, discursive et organisationnelle ? Il n'y a que trois possibilités. Soit l'on garde la multitude, avec les différences de chacun, et l'on renonce à une unité qui autrement serait tout à fait factice ; soit l'on s'efforce de garder, autant que possible, une symétrie entre les cultures en présence ; soit, à l'inverse, un rapport de domination, d'*emprise*[270] ou simplement d'invisibilisation marginalise certaines voix au profit d'une ou de quelques-unes d'entre elles. Pour être plus concrets, nous devons nous demander : quels rapports de force caractérisent les échanges entre disciplines différentes à l'intérieur des instituts de la complexité ? Le domaine des SSC se veut presque omni-disciplinaire, dans une optique de dialogue ouvert et antiréductionniste : ses militants soulignent souvent que la science newtonienne et laplacienne représente le vieux paradigme à dépasser. Or, l'élément computationnel est sans doute central dans ce domaine, grâce notamment à la formalisation – mathématique ou informatique – que l'ordinateur permet. À partir de nombreux extraits issus de différentes périodes historiques, afin de montrer la

[270] L'emprise est définie par Francis Chateauraynaud comme l'effet d'une *asymétrie de prises* entre des individus différents par rapport à des relations. Emprise est un autre nom pour les rapports de domination, où des individus gardent et exercent un pouvoir plus grand que d'autres sur une institution, sur un objet, sur un processus : Chateauraynaud, F., « L'emprise comme expérience. Enquêtes pragmatiques et théories du pouvoir », *SociologieS*, Dossiers, Pragmatisme et sciences sociales : explorations, enquêtes, expérimentations, mis en ligne le 23 février 2015, consulté le 21 septembre 2018. URL : http://journals.openedition.org/sociologies/4931.

continuité du projet épistémique des SSC, ce chapitre va montrer que ce domaine de recherche est dominé par une vision à la fois computationnelle, physicaliste, mathématique et darwinienne qui aborde et touche tous les domaines convoqués. De la physique à la société, en passant par les écosystèmes, selon cette optique tout fonctionne comme un réseau informatique ou comme un système ergodique régi par les formes de la sélection naturelle. Des gaz aux villes, en passant par les cellules, tout est traité comme une particule ou un atome interagissant avec d'autres particules et atomes, en suivant des règles ou lois de fonctionnement souvent simples. Et tout, des verres de spin aux MBA, en passant par les algorithmes génétiques, évolue selon les lois de l'évolution résumées par les termes de compétition, adaptation et changements aléatoires. *Notre thèse est que l'ordinateur représente un objet autour duquel se tissent souvent des collaborations interdisciplinaires, mais que celles-ci ne se font pas sur un pied d'égalité : la* culture épistémique *physico-computationnelle, informée d'une lecture particulière de Darwin, domine en effet les autres cultures en présence dans le domaine des SSC.*

En particulier, nous identifions quatre discours dominants, avec des variations de degré parfois remarquables entre les États-Unis et la France :

- l'affirmation d'une vision de la nature computationnelle, où le fonctionnement de chaque système se base sur l'information et la communication ;
- la poursuite d'objectifs souvent recherchés en physique, tel que celui d'une théorie unifiée ou d'une explication de phénomènes complexes à partir de règles simples ;
- la volonté de rendre plus scientifiques les autres sciences, en particulier en mathématisant les sciences de la vie et en naturalisant les SHS ;
- l'assimilation des mondes physique, informatique et social et des formes de vie biologiques, tel que régies par des principes inspirés d'une lecture spécifique de Darwin.

Murray Gell-Mann décrit les SSC comme antiréductionnistes et invoque la nécessité d'étudier chaque niveau avec la pertinence que son échelle demande : « [We must recognize] the importance of studying [complex systems] properties at their own levels […] In that sense, the founding of the Santa Fe Institute is part of a rebellion against the excesses of reductionism »[271]. Philip Anderson, en 1972, soutenait la même chose dans son fameux article *More is different* : « at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors require research which I think is as fundamental in its nature as any other »[272]. Autrement dit : « At each stage entirely new laws, concepts, and generalizations are necessary »[273]. Harold Morowitz, dans un compte-rendu du livre de Mitchell Waldrop sur l'histoire du SFI, synthétise le

[271] Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar. Adventures in the Simple and the Complex*, Londres, Abacus, 1994, p. 119.
[272] Anderson, P., « More Is Different », *Science*, New Series, 1972, vol. 177, n. 4047, pp. 393-396.
[273] *Ibid.*

projet épistémique du SFI ainsi : « The science of complexity is an attempt to break away from the Galilean-Newtonian simplicity that has served much of traditional physics so well and to tackle those real-world problems that do not yield to this neo-Platonic mold »[274]. Erica Jen, vice-présidente du SFI dès 1996, tisse l'éloge de l'approche interdisciplinaire de l'institut en termes d'enrichissements intellectuels réciproques que cela représente pour ses membres :

> « The best part of collaborating in a truly interdisciplinary fashion, when it works, is that it places a stress on researchers and how they think. By working together with researchers from different disciplines, you are literally forced, in the most constructive of ways, to think about different problems, to use tools and methods from other disciplines with which you are not familiar »[275].

À partir d'une lecture superficielle de la composition socio-épistémique des membres du SFI, on serait tenté de penser à un collectif dans lequel, de manière égalitaire, des scientifiques différents dialoguent, en gardant leurs cultures et leurs questionnements propres tout en s'enrichissant mutuellement. Par exemple, dans un programme interdisciplinaire sur les dynamiques évolutives de plusieurs systèmes, l'on peut, à travers les thématiques abordées, voir la transversalité des champs scientifiques représentés :

> « • Evolution of complex structure and form
> • Dynamics of evolutionary search
> • Molecular and genetic insights into evolution
> • Evolutionary, developmental, and ecological aspects of biodiversity ; and
> • Social and cultural evolution »[276].

L'évolution est abordée donc d'un point de vue mathématique, biologique, écologique et socio-culturel. Comment le dialogue peut être symétrique ? Soit l'exemple d'un échange entre un biochimiste et un politiste :

> « '[…] The scientists are informed by the sensibilities of other researchers. It has to do with a real change in perspective', [Jen] says. The collaboration between chemist Walter Fontana and political scientist John Padgett is one example. Through reading a paper Padgett wrote on the flowering of Florentine society, Fontana saw connections with abrupt physical transitions of many chemical reactions. 'There was a natural resonance in Padgett's analysis of Florentine society leading up to the Renaissance with the emergence of the first self-maintaining, self-reproducing cell,

[274] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 7.
[275] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 7.
[276] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. B.

> or how a new paradigm of organization comes into existence', says Fontana. Through sharing their science, both were able to see their own fields through different lenses »[277].

Les deux scientifiques se sont donc influencés réciproquement ? Fontana, biochimiste, donne une lecture physico-chimique de la société florentine ; Padgett, de son côté, s'en inspire. Le changement de perspective n'est pas biunivoque ou symétrique : il est unidirectionnel, des sciences naturelles vers les sciences sociales. Le dialogue entre deux *cultures épistémiques* est bel et bien présent, mais l'une des deux vient recadrer l'autre. Une illustration de cela est contenue dans un passage où le sociologue David Stark et Padgett, travaillant sur l'émergence des systèmes sociaux de la Florence de la Renaissance, tissent l'éloge de Fontana, qui lui travaille sur la façon dont émergent les systèmes chimiques auto-suffisants. Puisque tous les trois s'occupent de modéliser l'émergence par des modèles mathématiques et computationnels, des convergences et des homologies sont soulignées par les chercheurs en sciences sociales :

> « Fontana has used his verbal skills and understanding of the invisible links between complex systems to be helpful to social scientists. SFI visiting fellow David Stark, chair of the Department of Sociology at Columbia University, was interested in how organizations succeed by 'exploitation' (the mining of known resources) and 'exploration' (seeking new resources). Describing his discussion with Fontana, he says, 'Walter Fontana is one of the most incredible intellectuals I've ever met. That he could talk with people outside his field and explain to them, in terms they can grasp, without condescending or short-circuiting the idea, the complicated processes he was analyzing in his RNA work, was amazing'. […] Says John Padgett, a political scientist at the University of Chicago, 'Walter is interested in the folding in of chemical networks to get a self-sustaining system called a metabolism. If you look at my networks on marriage and economics in medieval Florence, pictorially there's a great similarity between his pictures and mine, though his are chemical and mine social. Mine fold in to produce political parties' […] So, because I'm looking for self-sustaining mechanisms, I've taken his models and used them for medieval Florence »[278].

Interdisciplinarité, dialogue et apprentissage réciproque, ce sont les finalités et les méthodes affichées par le SFI. Néamoins, lorsqu'on observe les pratiques et la mise en place de ce dialogue entre disciplines, l'on s'aperçoit vite qu'il y a bien de disciplines maîtresses et que toutes les disciplines convoquées ne sont pas mises sur le même plan. La fécondation réciproque entre *cultures épistémiques* distantes se concrétise

[277] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 20-21.
[278] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, pp. 6-7.

généralement par un transfert de méthodes et conceptions des sciences naturelles et de l'ingénieur aux sciences sociales, transfert conçu sur le papier comme symétrique.
Après avoir montré comment la théorie économique s'inspire de la physique et de la biologie, Brian Arthur affirme que l'économie peut, elle aussi, contribuer réciproquement à la physique : « In economics we have developed powerful non-linear probabilistic Strong Laws that may become useful in physical chemistry »[279]. Un autre exemple de cette quête de réciprocité se retrouve dans un bulletin de 1989, lorsque Stuart Kauffman explique que ses idées sont en train d'être utilisées par les économistes, mais que ces derniers l'ont inspiré pour appliquer la théorie des jeux à la biologie[280]. D'ailleurs, Arthur souligne la nécessité de garder en tête les limites de ces transferts : « Methods in other disciplines are instructive, but not always transferable »[281]. Paul Bourgine et Jeffrey Johnson, deux des entrepreneurs scientifiques ayant lancé les SSC en Europe, écrivent, dans la feuille de route pour la Commission Européenne, que le domaine de la complexité permet d'enrichir les sciences naturelles et les SHS : « Complex systems science bridges the natural and social sciences, enriching both »[282] ; ils affirment en outre que c'est impensable, pour les scientifiques issus des sciences naturelles et de l'ingénieur, de ne pas prendre en compte les connaissances propres aux SHS : « it is […] unthinkable that complex systems scientists should ignore the considerable corpus of knowledge accumulated in the social sciences »[283]. Mais là aussi, les outils privilégiés pour l'étude des systèmes complexes proviennent des mathématiques, de l'informatique et de la physique : « mathematics, computer science and statistical physics can bring new formalisms for representing complex systems dynamics in an elegant and useful way »[284].

L'importance de l'informatique

Si l'on en vient au premier des quatre types de discours que nous avons énumérés ci-dessus – celui sur la vision computationnelle du monde –, on note que pour Fontana l'ordinateur aide les autres disciplines à justifier leurs propres ontologies spécifiques :

> « Computer science was originally an engineering discipline, but more and more it has become a basic science on a par with physics and chemistry. It is providing novel concepts and mathematical techniques that other disciplines are increasingly using to justify their own ontology »[285].

---

[279] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 6.
[280] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, pp. 5-6.
[281] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 6.
[282] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006, p. 6.
[283] *Ibid.*, p. 8.
[284] *Ibid.*, p. 14.
[285] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 37.

Le fait que le SFI se base surtout sur des méthodes computationnelles est dit clairement dans un bulletin de 1992, lors de la présentation d'un workshop intitulé « Adaptive Computation » : « Much of the research at SFI involves computation in one or more of these roles, and the SFI's Adaptive Computation (AC) program was formed to coordinate and unify such research efforts »[286]. La computation adaptive, qui inclut Darwin dans le nom même, est décrite comme le chapeau sous lequel tous les autres projets du SFI de l'époque devraient être mis : « Adaptive computation is potentially such a broad area that many of the existing research projects at the SFI could come under its rubric »[287]. La centralité de l'ordinateur et de la puissance de calcul est vue par les représentants des SSC comme la cause même de l'essor du domaine. Morowitz, toujours dans son compte-rendu du livre de Waldrop, exprime de manière nette cette position : « The new approach is made possible, indeed it is mandated by computers »[288]. De l'autre part de l'Atlantique, Bourgine affirme avoir utilisé précisément cet argument pour convaincre les organismes publics qui ont financé l'entreprise dont il a été l'un des soutiens principaux :

> « Le SFI, le Cenoli et le CREA n'ont pas réussi à disséminer fortement les sciences complexes comme on réussit à le faire aujourd'hui, parce qu'aujourd'hui on a les instruments théoriques. Cela est arrivé progressivement au cours du siècle dernier et grâce à l'arrivée de données massives et des capacités computationnelles qui n'ont rien à voir avec celles qu'on avait dans les années 1990. La conjonction de ces deux événements est la raison pour laquelle on a réussi à convaincre tous les grands organismes la même année. Et on a utilisé exactement cet argument »[289].

Guillaume Beslon, bioinformaticien et membre de l'Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpin (IXXI), refuse la nouveauté radicale des SSC, en considérant que la seule chose nouvelle des années 2000 est précisément la puissance de calcul :

> « Mais Santa Fe, c'est 1984, la première cybernétique c'est les années 1940, Varela et tout cela c'est 1970 […] Huxley c'est 1890. Ce n'est pas du tout un truc nouveau la complexité, ce sont des idées qui datent des Lumières ! […] La seule chose qui est nouvelle dans l'histoire c'est que l'on a un outil pour faire tous les calculs qui sont sous-jacents à ces approches-là, de façon automatique, de façon rapide. C'est la seule chose qui est nouvelle. Donc, quelque part il y a eu une vocation, une possibilité de refonder cela au début ou au milieu des années 2000, parce que la

[286] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 24.
[287] *Ibid.*
[288] *Ibid.*, p. 7.
[289] Entretien avec Paul Bourgine, 29.05.13.

puissance de calcul était démocratisée et donc il y avait des moyens de faire quelque chose »[290].

L'informaticienne du SFI Melanie Mitchell relate que ses professeurs lui ont suggéré l'idée selon laquelle l'étude de la computation ne se cantonne pas qu'à l'informatique, mais qu'elle s'étend à tous les domaines du savoir et de la nature :

> « In my years in graduate school at Michigan, professors such as John Holland and Art Burks infused students with the notion that computer science is rightly the study of information processing, not only in computers, but throughout all of nature. Computational research at SFI captures that remarkable spirit »[291].

Dans une description des recherches menées par Mitchell sur les bulletins du SFI, on lit qu'elle essaie de comprendre comment les systèmes naturels calculent de l'information, mais aussi qu'elle essaie de s'inspirer des systèmes naturels pour concevoir de nouveaux logiciels : « Her work aims to understand how natural systems perform computation, and how to use ideas from natural systems to develop new kinds of computational systems »[292]. En Europe, la conviction n'est pas différente : selon la feuille de route de la communauté européenne des SSC, les systèmes complexes calculent : « Many complex systems can in themselves be seen as implementing computational processes »[293]. En citant le livre de Charles Snow sur les deux cultures, George Cowan dit dans ses mémoires souhaiter combler le décalage entre la culture naturaliste et la culture humaniste, mais c'est à l'aide de l'ordinateur que selon lui les deux peuvent être rapprochées :

> « In 1959 C. P. Snow began to write essays deploring the separation of academia into separate cultures. Academicians used the terms 'hard' and 'soft' sciences to distinguish natural science from social science. But in recent decades the mathematics of chaos and the ubiquity of computers have produced a convergence of interests between the cultures »[294].

Pour David Krakauer et Jessica Flack, respectivement président du SFI et chercheuse associée à ce même institut, la vie est foncièrement computationnelle[295]. Flack compare tout processus biologique au mode de fonctionnement décrit par la théorie de

[290] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[291] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 26.
[292] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 43.
[293] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006, p. 31.
[294] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute. The Memoirs of George A. Cowan*, Albuquerque, University of New Mexico Press, 2010, p. 131.
[295] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, p. 14.

la communication de Shannon et Weaver : « Describing a biological process as a computation minimally requires that we are able to specify the output, the input, and the algorithm or circuit connecting the input to the output »[296]. Quant à Krakauer, il soutient que la conjonction entre biologie et informatique portera ses fruits en médecine, notamment dans le soin des maladies les plus redoutables d'aujourd'hui :

> « What will we have learned if we learn how cells communicate ? Will we be able to send a signal to a cancer cell to prevent it from dividing ? Will we be able to keep the HIV virus in check ? Yes, asserts Krakauer, but not anytime soon. […] 'Biology, computer science, and information theory : that's where the revolution is going to be' »[297].

Le témoignage autobiographique de l'informaticien belge Hugues Bersini exemplifie le caractère souvent polyvalent des entrepreneurs scientifiques des SSC, ainsi que la versatilité technique et ontologique de l'ordinateur :

> « de toute la démarche d'intelligibilité du monde […] le récit scientifique est pour moi le plus porteur […] et donc, j'avais décidé assez tôt de rester dans la démarche de compréhension du monde par les sciences. Et ceci explique d'ailleurs le fait que je suis très pluridisciplinaire dans mon parcours, et donc […] la chimie m'intéresse, la physique m'intéresse, l'économie m'intéresse […] Et assez vite aussi, je me suis rendu compte qu'il y aurait un outil qui me permettrait d'affronter toutes ces problématiques, si je le maitrisais. Et j'ai eu une passion pour cet outil très tôt dans ma jeunesse, et bah c'est l'ordinateur […] Je me suis dit, normalement une bonne manière de comprendre un système c'est de le programmer, dans la simulation comme moyen de comprendre une réalité […] le premier jour où j'ai commencé à m'intéresser à l'économie, j'ai simulé une économie de marché, et le jour où je me suis intéressé à la chimie, j'ai simulé un réacteur chimique »[298].

L'informaticien Paul Chapron, qui a collaboré avec des sociologues en thèse et avec des géographes quantitativistes en postdoctorat, considère que, si l'approche qualitative est nécessaire, les SHS peuvent gagner en scientificité grâce à l'informatique, tout en perdant en détails :

> « Ce que l'on a eu beaucoup de mal à faire comprendre aux sociologues, c'est que ce que l'on perdait en précision et en niveau de détail en s'éloignant de la monographie, on le gagnait en objectivation et en rigueur mentale, réflexive, je ne

[296] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, p. 18.
[297] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 15.
[298] Entretien avec Hugues Bersini, 25.05.16.

sais pas trop comment on peut dire, scientifique quoi […] c'est mon Directeur de thèse qui disait cela. Mais je pense que c'est parfaitement résumé »[299].

Pour Cristopher Moore, professeur résident au SFI, la computation est en vigueur aussi dans le monde physique :

« Physics and computer science have a lot to say to each other, says SFI Professor Cris Moore, whose work lies at their boundary. Both examine how dynamics emerge from local interactions and how natural and artificial systems store and process information »[300].

L'importance de la physique

La physique n'est pas seulement un sujet passif puisqu'elle est un modèle à suivre, un savoir qui peut structurer les autres savoirs. On en vient donc au deuxième type de discours mené au sein des SSC : la poursuite d'objectifs physicalistes. Le premier aspect de l'influence de la physique sur les autres *cultures épistémiques* inscrites dans ce domaine concerne la conviction, selon laquelle la complexité des phénomènes supérieurs découle, en réalité, de phénomènes inférieurs et de lois, qui sont en soi simples. Une phrase de Gell-Mann, contenue dans les actes d'un des colloques fondateurs du SFI, a constitué à la fois la synthèse de cette philosophie et le cap à tenir en tête pour les membres des SSC : « Surface complexity arising out of deep simplicity »[301]. Cela deviendra un leitmotiv du SFI en général et de la vie artificielle en particulier[302], où l'ordinateur est jugé capable de produire des phénomènes authentiquement émergents, à savoir qui ne sont pas prévus ni explicitement programmés par les codeurs : « The most intriguing demonstrations have been those in which lifelike qualities have emerged spontaneously, surprising even the programmers »[303].

Tout comme l'on rêve d'une théorie (ou de plusieurs théories) unifiée(s) – selon le sous-domaine de la physique pris en compte –, de même au SFI on vise à parvenir à une théorie générale des systèmes complexes. Cette finalité est plus compréhensible si l'on examine la manière dont le SFI décrit la démarche physicienne :

« In physics, the search for a unified theory suggests determining the nature of physical laws, and how these interact with fundamental building blocks to capture essential regularities in the behavior of matter, such as galaxy formation among self-gravitating masses. In the physical domain, the ultimate goal of theory is

[299] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[300] SFI, *Santa Fe Institute 2012 Annual Report*, 2012, p. 1.
[301] Pines, D. (ed.), *Emerging Syntheses in Science. Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico. Volume I*, New York, Perseus Books, 1988, p. 3.
[302] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 15.
[303] *Ibid.*

generality achieved through highly compressed mathematical descriptions, leading, in turn, to accurate predictions »[304].

Comme on le verra dans le chapitre sur le SFI et comme le rappelle dans l'extrait suivant Robert Eisenstein, qui a été président de l'institut pendant un an, cette finalité est abandonnée relativement vite par ceux et celles qui en étaient les porteurs[305] :

« One of SFI's longest running and most distinctive research thrusts has been to develop a theory of the common themes that cross real-world complex systems. For despite differences in substrate, there are common principles and mechanisms that underlie the processes by which nature organizes complex systems and how they behave. In other words, there is often simplicity within complexity »[306].

Toutefois cette tendance générale est restée tout au long de la vie du SFI. Le travail des écologues Jim Brown et Brian Enquist et du physicien Geoffrey West sur la loi de puissance dans les êtres vivants va précisément dans ce sens : « They propose that the origin of this distinctive biological scaling arises from the fact that cardiovascular systems, respiratory systems, plant vascular systems, and insect tracheal tubes all exhibit the same fractal-like branching structure »[307]. Ces chercheurs y sont parvenus depuis des points de départ différents. West souhaitait comprendre la raison derrière la loi de Kleiber, à savoir le fait que le corps des animaux obéit à des simples lois de puissance pour ce qui est de leur taux de métabolisme. Brown et Enquist souhaitaient, de leur côté, déterminer la manière dont la densité des populations et d'autres lois écosystémiques se connectent aux lois biologiques qui gouvernent les individus[308]. Leur travail, critiqué depuis, était salué par le SFI pour le fait d'avoir peut-être détecté le phénomène biologique le plus universel : « quarter-power scaling is perhaps the single most pervasive theme underlying all biological diversity »[309]. Les chercheurs spéculaient déjà sur la présence de cette loi à toutes les échelles : « Altough the model addresses fractal branching networks on the macrobiological level, the researchers predict that subcellular systems will exhibit the same fractal patterns and obey the same laws of quarter-power scaling »[310]. L'enthousiasme pour cette recherche amena

[304] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 58.
[305] Des exceptions isolées existent, y compris pendant et après l'époque de la présidence d'Ellen Goldberg, qui comme on le verra marquera un changement de cap au SFI : « Crutchfield has in mind no less than a goal of a 'Grand Unified Theory of Complex Systems' capable of putting all complex phenomena under one mathematical roof. Such a law would be akin to that Holy Grail of physics that aims to explain all the forces of Nature : gravitational, electromagnetic, and nuclear, as particular instances of a single fundamental phenomenon. Today, after centuries of work, physics finds itself short one last mathematical bridge. After 20 years, complex systems is just starting its journey » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 13.
[306] *Ibid.*, p. 0.
[307] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2, p. 7.
[308] *Ibid.*, p. 8.
[309] *Ibid.*, p. 10.
[310] *Ibid.*

le SFI à lancer un programme sur l'allométrie dans plusieurs domaines de la nature pour explorer les conséquences et les extensions du premier modèle[311]. Le livre qui devait en résulter était censé contribuer à une unification conceptuelle de la biologie[312]. Il n'y a plus donc la recherche d'une théorie générale des systèmes complexes adaptatifs, mais la recherche de théories générales locales.
Le rêve physicien d'une théorie unifiée ne se borne pas à la biologie et à l'écologie, mais touche également à d'autres domaines. Prenons le cas de la médecine pour illustrer la démarche suivie par le SFI. Pour parvenir à une telle unification théorique, il faut, selon l'institut, faire une liste des points communs à différentes spécialités médicales :

> « Before we establish the mathematical foundations of a theoretical medicine, it will be necessary to identify regularities in the system dynamics of the body. Such a program requires a quantitative approach that spans the existing specialties. This was the objective of a recent meeting at SFI on the Foundations of Theoretical Medicine, sponsored by the National Institutes of Health. Practicing physicians have always been aware of important parallels among medical specialties. There has never been, however, a systematic way of identifying commonalities in the etiology of disease and their mechanisms of origin »[313].

L'unification passe par la compréhension d'un certain nombre de phénomènes transversaux, saisis par les concepts de variabilité, complexité, modularité, etc. : « In order to establish a theoretical medicine, the consensus of the meeting was that we need to come to a better understanding of a number of core concepts, which include variability, complexity, modularity, adaptability, robustness, and scaling »[314].
De la médecine on passe à la psychologie. Un article du bulletin de l'été 1994 est dédié au psychologue cognitiviste Roger Shepard qui, formé en physique théorique, abandonne ce domaine pour se consacrer à un projet qui rentre dans le moule du SFI : « I felt there were some fundamental aspects of the physical world that could be applied to psychology as well »[315]. Shepard affirme poursuivre la recherche de principes généraux sous-jacents au fonctionnement de l'esprit, en reprochant les psychologues de ne pas avoir été suffisamment ambitieux d'un point de vue théorique : « Essentially, Shepard has pursued the question : could there be some general principles of the mind that are not unlike the universal laws of physics ? 'I've come to the view that psychologists haven't been thinking big enough', he says »[316]. La psychologue bulgare Mirta Galesic, associée au SFI, dit avoir eu à la fois de la

[311] *Ibid.*
[312] *Ibid.*
[313] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, pp. 58-59.
[314] *Ibid.*, p. 60.
[315] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 14.
[316] *Ibid.*

sympathie pour les physiciens qui étudient les sociétés humaines en les comparant à des particules physiques : « I have a sympathy for physicists, who say let's look at humans as particles, who are just following simple rules like imitating a random person around »[317]. Elle avoue d'ailleurs s'être sentie pendant longtemps mal à l'aise en raison de sa discipline « molle », mais qu'elle a regagné confiance lorsqu'elle s'est rendue compte qu'étudier les humains est plus difficile que les sciences de l'ingénieur :

> « I have to admit that for a long time […] I felt a bit embarrassed to be a psychologist because we seem like softie. Probably people still think that we're mainly using mouth. But then now I'm not embarrassed anymore because I realized this is the most difficult part studying […] humans. That's more difficult than rocket science »[318].

Ronda Butler-Villa, l'une des personnes du staff qui a fait partie du SFI dès le début, confirme l'importance de la physique dans la première phase du centre : « There was a heavy bent to physics at [the beginning], to be honest. Not that physics was going to save the world, that would be too broad, but the idea that the rigor of physics was going to bring something to other disciplines, that would be really useful »[319].
En Europe la situation n'est pas différente car, dans la feuille de route européenne, on lit que les SSC doivent fonctionner comme la physique, en construisant les modèles à partir des données empiriques : « The Science of Complex Systems will develop in the same way that physics has developed during the three last centuries through a constant process of *reconstructing models from constantly improving data* »[320]. La même feuille, dans la même page, précise que les SSC doivent aboutir au même type de formalismes qu'en physique :

> « Physics has used formalisms from mathematics elaborated over the three last centuries to express its dynamic constructs unambiguously. Similarly, Complex Systems Science has to create pertinent formalisms, depending on the particular types of complex system involved »[321].

Si les fondateurs du SFI étaient des experts de la physique nucléaire ou de la théorie des supercordes, l'influence de la physique sur les SSC vient également d'autres domaines de cette discipline. En particulier, le courant de la physique statistique a joué

[317] Entretien avec Mirta Galesic, 06.10.16.
[318] *Ibid.*
[319] Interview Ronda Butler-Villa, 3.11.16.
[320] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006, p. 12.
[321] *Ibid.*

un rôle important, comme le disent des représentants français du domaine, qui, accompagnés d'un épistémologue, ont écrit un article sur les trois « visions » qui structurent selon eux le champ de la complexité :

> « Selon la vision physicienne, un système complexe est composé de nombreux éléments en interaction, qui présentent un comportement collectif différent de celui obtenu par la simple juxtaposition des comportements individuels […] Cette définition est imprégnée du cadre de la physique statistique, même si elle est étendue à des systèmes biologiques et sociaux »[322].

Le parcours de la géographe Denise Pumain, qui a joué un rôle important dans le lancement des SSC en France, éclaircit comment la physique a joué un rôle de modèle pour la géographie quantitative qu'elle a contribué à fonder. Cela vaut la peine de s'y attarder davantage puisque la géographie quantitative permet de mieux éclairer le rapport spécifique entre les outils computationnels et les SHS : « Mon parcours, nous a dit Pumain, est celui d'une géographe universitaire très banal, normal. Je suis passée par l'ENS, l'agrégation en géographie, ensuite j'ai obtenu un poste à l'université, mais je me suis vite intéressée à tout ce qui permettait de formaliser les connaissances »[323]. Dans ce qu'elle appelle l'« école française de géographie », hégémonique au niveau international entre les deux guerres, on mélangeait sciences naturelles et sciences sociales, mais selon elle « on n'insistait pas beaucoup sur la méthodologie »[324]. Puisque d'après Pumain « [o]n manquait cruellement d'outils statistiques »[325], elle se lance, dans les années 1970, dans des études qui la mènent à modéliser les données géographiques, tout en n'ayant pas une formation en mathématiques. Lors de sa thèse doctorale au Québec, elle apprend le Fortran, « [u]n peu par hasard, sans trop savoir à quoi ça pouvait servir : je voulais faire l'anglais, mais les cours étaient complets quand je suis arrivée »[326]. Une fois rentrée en France, en septembre 1971 elle suit « un grand stage, avec d'autres, soixante géographes français, d'initiation aux statistiques et mathématiques, duré trois semaines »[327]. Elle y apprit « beaucoup de choses en probabilités, en analyse multivariée, en statistique élémentaire, un peu de topologie, les réseaux »[328]. Le stage aurait marqué tous ceux et celles qui y participèrent, en les soudant et en les renforçant dans la poursuite de ce parcours[329]. Intéressée par

---

[322] Deffuant, G. et al., « Visions de la complexité », *op. cit.*, p. 45.
[323] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[324] *Ibid.*
[325] *Ibid.*
[326] *Ibid.*
[327] *Ibid.*
[328] *Ibid.*
[329] Sylvain Cuyala, un ancien doctorant de Pumain, a fait sa thèse sur l'histoire du tournant quantitatif en géographie en France : Cuyala, S., *Analyse spatio-temporelle d'un mouvement scientifique. L'exemple de la géographie théorique et quantitative européenne francophone*, Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2014.

l'évolution des structures urbaines, Pumain s'est emparée des modèles de systèmes dynamiques à la Forester. En 1982, elle se rend à une conférence à Bruxelles où elle rencontre l'école de Prigogine, qu'elle connaissait déjà par le biais d'une conférence sur l'entropie qu'elle avait suivie à Créteil : « Je m'y intéressais parce que j'avais travaillé dans ma thèse sur les questions de distribution des tailles des villes, donc sur les lois de Zipf, sur les modèles de Gibras, et tout ça »[330]. À la conférence de Bruxelles, Pumain écouta l'intervention de Peter Allen, un chimiste de l'équipe de Prigogine, qui portait sur le concept d'auto-organisation. Inspirée par la similitude qu'elle trouvait entre ces modèles chimiques et les changements qu'elle avait observés dans les villes, la géographe eut un échange avec le scientifique et entama une collaboration avec l'équipe du prix Nobel. Elle put adapter avec Lena Sanders, géographe rattachée dans la même UMR qu'elle, un modèle en Fortran développé à Bruxelles, qui leur aurait donné la dimension spatiale qui, selon elles, manquait aux modèles de Forester. À la même époque, les deux géographes découvrent aussi le groupe autour d'Hermann Haken qui travaillait sur la synergétique. Parmi d'autres écoles d'été et stages de modélisation, Pumain et Sanders participèrent à une initiative organisée par l'OTAN à Olsstom, où elles connurent le géographe américain, Daniel Griffith, un spécialiste des statistiques spatiales et de géographie urbaine et économique. Le chemin de la géographie quantitative avait été tracé : après le modèle synergétique, dans les années 1990 ce fut le temps des réseaux de neurones et des MBA : « les français sur les modèles multi-agents étaient en avance en informatique par rapport aux USA »[331]. Entre la fin des années 1990 et le début des années 2000, elle se rend plusieurs fois au SFI, où elle entame des rapports de collaboration avec Geoffrey West et Luis Bettencourt, des physiciens passés à la géographie quantitative[332]. La collaboration, qui incluait d'autres chercheurs et chercheuses américains et européens et qui était financée par la Commission Européenne, donna lieu à une publication commune[333]. Toutefois il y eut des divergences entre les deux groupes principaux, celui de Pumain et celui de West. En négligeant les conflits organisationnels et relatifs aux citations scientifiques qui furent l'objet principal de la discorde, concentrons-nous sur l'aspect épistémique. Pour Pumain, la modélisation sert à détecter et formaliser les phénomènes prévisibles, les phénomènes récurrents de la géographie :

> « [Les modèles] pour moi c'est des instruments, ce sont des filtres qui me permettent de retirer de mes observations la trivialité, ce qui marche tout seul, ce que je peux reproduire dans un modèle et donc qui peut m'aider à dégager la part

[330] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[331] *Ibid.*
[332] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[333] Lane, D., Pumain, D., van der Leeuw, S.E. & West, G., *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*, Amsterdam, Springer, 2009.

prévisible de l'évolution. Parce que l'imprévisible on ne peut pas le modéliser par définition. Mais il y a une partie de dynamiques quasi autonomes qu'on connaît. Et donc en regardant du côté des systèmes complexes, et l'ordinateur est là pour nous aider à les simuler, on prolonge des trajectoires de manière plus intelligente qu'en faisant ça sur une période ou sur un graphique »[334].

Il s'agit d'un usage instrumental et limité, mais la physique reste le modèle de cette géographie quantitative, qui lui emprunte des lois de gravité, des lois de puissance ou une attention pour les flux de matière et d'énergie. Si cela est vrai pour Pumain et son laboratoire, cela est d'autant plus vrai pour West et Bettencourt qui sont des physiciens de formation. Leur objectif est d'étudier les organisations sociales, en trouvant des principes universels pour modéliser les processus historiques :

« West and his team are applying these notions to social organizations. They're working to formulate a general quantitative theory of such networks based on a set of universal principles. The work addresses many problems. One main one is defining what a social organization is and how information flows within it. Another is coming up with appropriate scaling laws for social organizations. Yet another is determining what constraints must be satisfied by the architecture of the structures that channel social flows of information, matter, and energy. And finally, finding out what kinds of historical processes might result in anything like efficiency maximization for the social structures that regulate the flow of information, matter, and energy, and how these processes might be modeled »[335].

La critique portée par Pumain vis-à-vis des chercheurs du SFI est de traiter les villes comme des systèmes ergodiques, tels que les gaz[336]. Un système ergodique est un système pour lequel on peut considérer que la valeur moyenne d'une grandeur calculée statistiquement est égale à la moyenne d'un très grand nombre de mesures empiriques prises au cours du temps. Théorie considérée par les scientifiques comme un point faible de la physique statistique, elle est validée sur les gaz seulement a posteriori. Partant, selon Pumain, cette inférence, que les physiciens du SFI tirent des données urbaines dont ils disposent, découle d'une pensée déterministe qui naturalise les villes ; la géographe invoque plus de précautions interprétatives, surtout si ces connaissances sont utilisées pour faire de l'aide à la décision.
Interrogée sur son positionnement dans le débat sur la naturalisation des SHS, Pumain répond que « [t]out dépend des niveaux auxquels on cherche l'explication »[337]. Elle considère qu'« [i]l n'y a pas de classes de phénomènes qui soit nécessairement

[334] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[335] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, pp. 33-34.
[336] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[337] *Ibid.*

imprédictible »[338], en entendant par là le fait que les sociétés humaines ne soient pas en tous points imprédictibles. Elle soutient plutôt que certains phénomènes humains, imbriquant toujours « des effets naturels et des effets sociaux »[339], possèdent des dynamiques qui sont explicables, voire prédictibles, puisqu'« on peut trouver des déterminants »[340]. Le fait que Saint-Pétersbourg ait été fondée d'un jour à l'autre par le tsar Pierre Le Grand en 1703, à cause de sa position stratégique et de ses ressources, « c'est […] complètement imprévisible et là la décision relève du libre arbitre pour ce qui est de l'exploitation de la ressource, mais la présence de la ressource est complètement orthogonale au niveau politique »[341]. Dit plus clairement : « C'est ce que j'ai proposé de distinguer dans l'évolution des villes, pour moi il y a une part de dynamique qui est justement modélisable, répétable, et une part d'histoire »[342]. Sous le terme d'histoire, elle range l'« évènementiel » ainsi que l'innovation techno-économique et culturelle, qui peut faire prendre une direction à l'histoire plutôt qu'une autre : « On aurait pu commencer par les moteurs diesels avant ceux à essence par exemple »[343]. Interrogée sur le débat autour du libre arbitre, elle répond que sa méthode est scientifique, non pas philosophique :

> « c'est une affaire d'opinion individuelle, on y croit ou on n'y croit pas. Quand on est un scientifique […] on applique la méthode scientifique. Ce qu'on s'attache à révéler ce sont des éléments sinon prédictibles, du moins compréhensibles, explicables. On est constamment dans une recherche explicative qui ne relève pas de l'arbitraire »[344].

Sur la distinction entre qualitatif et quantitatif qu'elle a l'habitude d'entendre, Pumain rétorque que la distinction n'a pas de sens, car les chiffres ne quantifient rien si les phénomènes ne sont pas rangés dans des catégories, qui, elles, font débat :

> « c'est toujours la première remarque que fera un soi-disant qualitativiste. J'y crois pas du tout à cette césure. Il va dire que le chiffre enferme, que le chiffre trompe, que le chiffre est limitant, réducteur et que dès l'instant qu'on manipule des chiffres, on ne voit pas la vraie réalité autour. C'est des discours que j'entends depuis le début de ma carrière, cette mésentente-là risque de durer longtemps. Elle est parfois aussi entretenue pour des raisons sociologiques et politiques. […] Les chiffres font partie du débat. […] Je pense que travailler avec les chiffres, et ça je l'ai vu en travaillant avec des démographes, des statisticiens, c'est toujours aussi faire du

[338] *Ibid.*
[339] *Ibid.*
[340] *Ibid.*
[341] *Ibid.*
[342] *Ibid.*
[343] *Ibid.*
[344] *Ibid.*

> qualitatif parce que la définition des catégories, la manière de mesurer les observations, de tenir compte de celles qui collent pas tout à fait avec ce qu'on a posé, c'est une préoccupation constante des gens qui produisent du nombre. […] Les catégories servent à préciser les observations et les mesures chiffrées [sont] une autre manière d'apporter aussi de la précision »[345].

Pour la géographe, considérer la rationalité des SHS comme différente de la rationalité des sciences naturelles était une stratégie pour ne pas se faire envahir par les secondes, dans l'attente de développer des outils suffisamment forts pour mener des recherches quantitatives en autonomie. De cela elle explique en avoir discuté avec Jean-Claude Passeron :

> « C'est une discussion que j'avais eue avec Jean-Claude Passeron à propos de son ouvrage sur le raisonnement sociologique, où il essayait de différencier le raisonnement des scientifiques de la nature de celui des scientifiques des sciences humaines, improvisant un argumentaire montrant la forte dépendance des faits sociaux au contexte spatio-temporel et l'incapacité où se trouveraient les sciences historiques de produire des avancées scientifiques valables […]. Il avait l'air d'en déduire qu'il y avait des formes de raisonnement spécifiques aux sciences sociales »[346].

Pumain explique avoir engagé un débat avec Passeron là-dessus, en lui rétorquant que selon elle il n'y a qu'une rationalité, qui est partagée par les deux cultures et qui marche selon des arguments et des preuves : elle relate que Passeron « a fini par en convenir »[347]. Selon Pumain, le sociologue lui a parlé d'une « position stratégique » que les SHS devaient assumer « pour essayer d'exister avec [leurs] particularités » et pour éviter que les scientifiques « se mêlent des sciences sociales », puisque quand cela arrive « c'est dévastateur », car « trop réducteur, trop analytique, trop formalisé mathématiquement »[348]. Elle dit ensuite qu'ils sont tombés d'accord sur la nécessité de garder une distance avec les sciences dures,

> « en attendant qu[e les SHS] bénéficient d'autant de moyens que les sciences naturelles et physiques pour développer leurs enquêtes, pour avoir un socle de ressources et de faits, et des méthodologies qui leur permettent d'affronter les sciences de la nature. Ce que nous à notre échelle on essaie de faire »[349].

---

[345] *Ibid.*
[346] *Ibid.*
[347] *Ibid.*
[348] *Ibid.*
[349] *Ibid.*

Il y a toutefois à l'intérieur de la communauté des SSC françaises des voix critiques face à cette volonté de scientifiser les sciences de la vie et les SHS. Guillaume Beslon, de l'IXXI de Lyon, nous a raconté que Pablo Jensen et lui-même ont refusé le projet de Michel Morvan qui était, selon eux, de s'approprier des objets d'étude d'autres disciplines pour les traiter avec des outils de la physique et de l'informatique :

> « Michel Morvan était quand même sur vraiment une logique très, très dure, c'est-à-dire que le but de l'IXXI […] c'était, 'On va développer des théories de la complexité en informatique théorique et en physique, et ces théories on va les appliquer à des objets qui sont des objets essentiellement biologiques et sciences humaines'. C'est-à-dire qu'il y avait vraiment un côté 'réapproprier ces objets biologiques et sciences humaines ou les faire basculer dans un autre champ de la modélisation dure'. […] [nous n'avons] jamais été complètement sur cette logique-là »[350].

Cette tendance de la géographie quantitative de regarder du côté des sciences de la nature et en particulier de la physique n'est pas allée sans recevoir de critiques. Le géographe Pierre George, dans un article de 1976, taxe par exemple ce courant de « scientiste », car son déterminisme est une approche qui fait abstraction des facteurs socio-historiques et psychologiques[351]. La géographe Elise Beck, qui ne code pas en première personne mais qui collabore avec des informaticiens experts de MBA, explique que des collègues des SHS, lors des colloques scientifiques ou dans d'autres occasions, mobilisent un certain nombre de critiques envers ce type de modélisations :

> « La modélisation c'est une simplification du monde, le système que vous modélisez est beaucoup trop complexe justement pour pouvoir être réduit à ce que vous en représentez, à quoi ça sert, comment vous validez ? Parfois on a des difficultés à valider, du coup ça sert à rien »[352].

Des résistances existent à l'intérieur même de la géographie quantitative, comme le montre le passage d'un livre autobiographique du géographe et modélisateur Arnaud Banos, directeur de Géographie-Cités. Après avoir critiqué un modèle de ville qu'il considère comme réductionniste par rapport à l'ontologie des systèmes sociaux, il commente ainsi :

> « J'y vois pour ma part, dans une certaine mesure, une manifestation de l'influence considérable exercée par la physique dans le domaine de la modélisation des

[350] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[351] George, P., « Difficultés et incertitudes de la géographie », *Annales de géographie*, 1976, vol. 85, n. 467, pp. 48-63.
[352] Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.

systèmes complexes. […] Pourtant […] il est fondamental pour la géographie de continuer à développer son propre corpus. […] Si le principe de parcimonie reste à mes yeux un guide de formalisation incontournable, je lui reprocherai volontiers de favoriser une certaine forme de domination des modèles les plus simples »[353].

En définitive, la culture physicienne semble indispensable à toute tentative de formalisation, car elle apprend aux scientifiques à faire abstraction des détails, comme le montre ce passage d'un entretien avec le physicien et épidémiologiste computationnel Alessandro Vespignani, basé dans le département de santé publique de la Northeastern University de Boston :

« les physiciens sont un peu, comme je les appelle, les artistes de l'approximation, c'est-à-dire que ce que nous apprenons dans notre jeunesse consiste dans le fait de prendre un problème et de le simplifier jusqu'à avoir une solution sensée et ensuite de commencer à complexifier cette solution pour voir des choses plus réalistes. Et ça ça te reste dans l'esprit et c'est une démarche très différente de celles des autres champs, dans lesquels tu dois en revanche partir dès le départ par une montagne de détails, car sinon c'est insuffisant »[354].

Ainsi, l'inflexion que les physiciens, devenus épidémiologistes computationnels, peuvent produire en matière d'épidémiologie réside dans la fabrication de nouveaux outils numériques, où les savoirs et les techniques de la physique statistique sont employées pour résoudre des problèmes épidémiologiques. Ce qui porte le nom de « transition de phase » en physique statistique est alors renommé avec le terme de l'épidémiologie : « seuil épidémique »[355].
Une physicienne statisticienne associée à un institut de la complexité européen donne une définition du domaine des systèmes complexes qu'elle qualifie de cynique :

« Alors si j'étais cynique, je dirais que c'est beaucoup de physiciens statisticiens qui veulent faire des choses différentes, c'est-à-dire ne pas rester dans la physique habituelle et qui vont toucher un peu à tous les domaines sans avoir forcément l'expertise, et je fais partie de ça, parce que finalement je travaille sur des domaines d'application qui sont assez variés […] je ne vais pas avoir l'expertise pour chacun d'eux, mais je vais essayer d'appliquer des outils avec lesquels je suis un peu plus familière en espérant qu'il va y avoir des résultats intéressants. Et bien sûr, après on a toujours besoin d'une interprétation par des gens qui ont un peu plus d'expertise dans le domaine. Dans ça c'est le côté un peu cynique de dire que ce serait des

[353] Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre. Itinéraire d'un géographe*, Paris, Éditions Matériologiques, 2016, p. 45.
[354] Entretien avec Alessandro Vespignani, 11.07.16.
[355] *Ibid.*

physiciens qui s'ennuient et qui vont aller faire quelque chose de non-traditionnel »[356].

L'importance des mathématiques

Le troisième type de discours et de projet épistémique des SSC concerne la volonté de rendre plus scientifiques les autres sciences, en particulier en mathématisant les sciences de la vie et en naturalisant les SHS. Dans le bulletin du SFI de 1994, le propos est posé sans ambiguïté : « Essentially, Cowan's vision has been to apply the quantitative tools of the physical sciences, such as mathematics, to the social sciences »[357]. Cowan relate, sans prendre de distance, que l'un de ses amis ne lisait pas d'articles qui ne contenaient pas d'équations : « One of my friends says he judges papers by the ratio of narrative to equations. If he doesn't find a single equation, he doesn't read the paper »[358]. Ce qui ne va pas sans rappeler la fameuse phrase d'Ernst Rutherford sur la nature de la science : « All science is either physics or stamp collecting »[359]. L'approche du SFI est celle de s'intéresser aux phénomènes dynamiques mesurables : « The operative word is 'measurable'. It's the difference between description and dynamics, 'the latter being what people do around here' »[360]. Gell-Mann, en parlant du mépris que ses collègues physiciens manifestaient pour les SHS comme la psychologie, revendique la tentative de les rendre scientifiques, plutôt que de les congédier avec désintérêt : « Even if I agreed [with my colleagues of CalTech] that subjects like psychology are not yet sufficiently scientific, my preference would be to take them up in order to participate in the fun of making them more scientific »[361]. Mais Gell-Mann est un physicien, comme les autres fondateurs du SFI. Quid des *social scientists* qui ont été enrôlés par l'institut ?

L'idée que les fondateurs du SFI ont des SHS est plus à même d'être comprise, lorsqu'on prend en compte les positions des psychologues ou des anthropologues qu'ils ont enrôlés dès le départ. En 1984, à l'occasion du colloque *Emerging syntheses*, l'anthropologue Irven DeVore et le psychologue John Tooby défendent la sociobiologie d'Edward O. Wilson, en contre-tendance par rapport à leurs collègues des SHS. L'anthropologue part du presupposé selon lequel il n'y a pas de théorie élegante et satisfaisante dans les sciences sociales, qui seraient selon lui dans un état de désarroi : « To my mind, there is, at present, no deep, elegant, or even intellectually satisfying theory in social science. […] I believe they have been seriously floundering for more than a decade, and are today in a state of disarray »[362]. DeVore regrette que les critiques à la sociobiologie aient été immédiates et virulentes : « the attack on

[356] Entretien avec anonyme.
[357] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 3.
[358] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 3.
[359] Birks, J.B. (ed.), *Rutherford at Manchester*, New York, Benjamin, 1963.
[360] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 3.
[361] Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar*, *op. cit.*, p. 119.
[362] Pines, D. (ed.), *Emerging Syntheses in Science*, *op. cit.*, p. 55.

sociobiology […] was immediate, immoderate and immense »[363]. Il attaque les positions culturalistes de ses collègues et préconise un futur court pour les SHS si elles ne s'ouvrent pas à la biologie :

> « Although they would not put it so crudely, my colleagues in social and cultural anthropology seem to be comfortable with the belief that biology and natural selection successfully delivered *Homo sapiens* into the upper Paleolithic, and then abandoned our species to the pure ministrations of culture. […] From my point of view, such attitudes threaten to leave the social sciences on a very small and sandy island in a rapidly rising river »[364].

Wilson sera cité d'autres fois dans la suite de l'histoire du SFI[365]. Quant à Tooby, dans un cadre évolutionnaire et cognitiviste, il opte pour la métaphore computationnelle, en décrivant la psychologie humaine comme une constellation d'algorithmes : « the primary task of human evolutionary psychology is the elucidation of this constellation of guiding algorithms »[366].
Les choses n'ont pas changé au cours du temps. Elisabeth Wood, une politiste de formation physicienne, condense bien la philosophie du projet épistémique du SFI, en disant qu'elle consiste en une manière de penser transposable à d'autres domaines[367] :

> « [Elisabeth Wood] believes her background in physics helps her work today. 'It's an excellent intellectual background to have, both for the specific training in modeling, mathematics, and statistics and the general socialization in analytical thought', she says. 'If you learn to be analytical in one subject, you can bring that to another subject' »[368].

Cowan a été, en première personne, l'un des porteurs principaux d'une scientifisation des SHS. Cela est visible dans le projet que le SFI lança en 2002 sur l'étude du cerveau, composé de psychologues du développement, de neuroscientifiques cognitifs, de neurologistes et de neurobiologistes[369]. L'objectif est déclaré clairement : connecter les « sciences dures » à la psychologie, pour relier le comportement visible des humains au substrat neural :

---

[363] *Ibid.*, p. 57.
[364] *Ibid.*
[365] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 4.
[366] *Ibid.*, p. 70.
[367] Cela résonne avec ce que dit Robert Eisenstein sur le même sujet : « 'Physics is an attitude', says Robert Eisenstein, while sitting in his corner office at SFI. 'It's an approach, a way of analyzing problems you learn when you study physics. If you can learn it well, you can take it on the road' » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 2.
[368] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 3.
[369] *Ibid.*, p. 8.

« The project, titled 'Increasing Human Potential', is the vision of SFI Distinguished Fellow George Cowan, who, after years of contribution to science […] remains determined to apply hard-science methods to the behavioral study of the brain. 'There have been a lot of studies of psychology, which is concerned with behavior', says Cowan, 'but psychology deals only with externally observable behavior, not with underlying neurophysiological processes. One of the several things that make this project unique is the parallel assessment of behavioral development and the growth and maturation of many of the critical neural functions that shape behavior' »[370].

La linguistique a été également visée par un projet dirigé par Gell-Mann, par le linguiste russe Sergei Starostin et par le linguiste américain Merritt Ruhlen, afin d'étudier l'arbre généalogique des langues[371]. Voici leur argumentaire : la linguistique diachronique classique avait jusque-là catégorisé les 6000 langues existantes en plusieurs familles, chacune ayant son ancêtre individuel, et cela à travers une méthodologie basée sur l'identification d'un ensemble de similarités phonétiques[372] ; ces efforts étant qualifiés de « pré-science », maintenant il faut de la vraie science, à savoir un usage mathématique dans l'étude de la phylogenèse des langues pour faire de la « glottochronologie » :

« These achievements are, in the words of Starostin, 'pre-science', insofar as they are obtained without mathematical tools. However, it is in the search for deeper levels of organization, and in the investigation of temporal considerations, that the tools of mathematics and statistics truly come to the forefront. Those tools mark a transition from pre-science to science for comparative linguistics, and the starting point of the discipline of 'lexicostatistics' or 'glottochronology', originally started in the United States by Maurice Swadesh. It is in this domain that SFI is making a big contribution »[373].

Le groupe traite les langues – que d'autres qualifieraient de réservoirs de sens, de métaphysique, d'histoire, de contingence – comme des objets physiques et biologiques auxquels on peut appliquer des régularités mathématiques :

« While the replacement by borrowing is unpredictable, replacement by synonym seems to follow a standard model of genetic drift, the mechanism that many believe is responsible in biology for the species diversity we see today. In the context of language this model provides a means by which the times of language divergence

[370] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 8.
[371] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 11.
[372] *Ibid.*
[373] *Ibid.*, p. 12.

can be estimated. At work here is an implicit assumption of a regular process of change, which Starostin likens to the measurable rate of isotope decay that makes carbon dating the exact science that it is today. The glottochronological version of carbon dating suggests that one word of basic vocabulary is replaced roughly every 200 to 300 years or about five over a millennium »[374].

L'objectif est de mathématiser les connaissances, afin de découvrir, dans ce cas spécifique, la langue-mère commune à toutes les langues à travers l'emploi de la langue-mère que sont les mathématiques :

« Our generation is bearing witness to a long-overdue mathematicization of the life and social sciences, a modern updating of the Tower of Babel tale in which, through the ever-broadening mediation by the universal language of number, scientific knowledge is growing via a renewed unification across disciplines. SFI's work to find the Mother Tongue is yet another instance of the progress propelled by the rewriting of sciences in the Mother Tongue of mathematics »[375].

Un tel projet de scientifisation des SHS n'est pas étonnant si on connaît l'opinion, répandue parmi les fondateurs du SFI, de l'utilité de la physique par rapport au reste des sciences de la nature : « The physical sciences have made immense contributions to human betterment. By contrast, the contribution of the behavioral sciences appears modest, and inadequate to the contemporary challenges »[376]. Les « sciences molles » – et cette expression inclut aussi la biologie – sont vues comme des sciences « brouillonnes », qu'il faut unifier sous le langage commun des mathématiques et de la computation :

« Self-organization would be the lens through which all of life could be seen, quantified, and well, organized – putting the messy sciences that are biology, sociology, and economics (as well as some of the most complicated physical phenomena) into a universal framework where mathematics and computation would guide research and discovery »[377].

Il ne s'agit pas de réduire tout au physique, pas plus qu'il n'est véritablement question de nier la spécificité ontologique de chaque niveau de la nature et de la société. Il

[374] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, pp. 13-14.
[375] *Ibid.*, p. 14.
[376] *Ibid.*, p. 30.
[377] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 4.

s'agit plutôt de voir chaque niveau ontologique de la même manière que l'on voit, et l'on étudie, le niveau physique[378].

À la fin des années 1980, l'idée du SFI pour mettre en place l'interdisciplinarité consiste dans la mise en collaboration entre généralistes et spécialistes, entre théoriciens et expérimentalistes[379]. Cette collaboration est requise aussi pour mathématiser la biologie : « Experimental biologists often have forgotten the mathematics learned during their college and graduate school days and, in most cases, have not established ties with mathematicians and physicists »[380]. Au SFI, un projet sur cinq ans, financé par le National Institute of Health, a été organisé en 2001 pour faire un rapprochement entre physiciens et mathématiciens d'un côté et biologistes de l'autre, dans un échange asymétrique des premiers vers les seconds :

> « The program is designed to accomplish the following aims : Educate experimentalists in the use of modeling and simulation tools in order to gain a deeper understanding of biological problems and their complexities.
> • Introduce mathematicians and other theorists to the language and concepts of biological systems.
> • Encourage collaborations among theorists and experimentalists through ongoing working groups and visitor programs that will convene at SFI (and at collaborating institutions) throughout the year »[381].

S'il est vrai que les humanistes associés au SFI en partagent souvent les prémisses épistémiques et politiques, il ne faut pas négliger les rares cas de divergence de la part de certains d'entre eux vis-à-vis de l'attitude pédagogique des « gourous » du SFI à leur égard. L'un des premiers programmes de recherche de l'institut dans lequel des représentants des SHS ont collaboré avec des informaticiens concerne l'archéologie. Après un premier workshop interdisciplinaire, l'archéologue George Gumerman, expert du Sud-Ouest américain et de l'Océanie, s'adresse à Gell-Mann dans une lettre publiée dans le bulletin de l'automne 1993, dans lequel l'opération de conquête et d'appropriation de la part des physiciens envers les autres disciplines est mise en cause :

---

[378] « While the deeper questions about the ontological role of laws were largely left unresolved, a serious attempt was made to account for the specific universal features of life that are simplest and most primitive, for which the predictive power of biological laws should most resemble that in physics and chemistry. For these very old features, universal occurrence is more likely to indicate that few solutions to biological 'function' were possible, and that this is why we have the forms we do. Understanding these structures is also likely to be critical as we try to piece together the origin of living from nonliving matter » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 17.

[379] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 14.

[380] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 27.

[381] *Ibid.*

« My problems, écrit Gumerman, concern what I think might be some misunderstandings between the SFI complexity folk (mainly Stu Kauffman, Chris Langton, and perhaps yourself) and the collected Southwest archaeologists ; on a more pessimistic note, I'm worried about one of the assumptions of the conference : if Southwest archaeologists can only learn about 'complexity' from the SFI experts, they will become better archaeologists. I write this memo, then, presuming that you'll tell me where I'm off base on how the SFI investigates 'complexity' and also whether my own notions of complexity in archaeology are of any interest to the gurus at the SFI »[382].

La lettre continue avec l'exposition des manières d'entendre la complexité en archéologie, ainsi qu'avec les questions qu'il faut maintenant poser ensemble, physiciens et archéologues. Il s'agit donc d'une réaction assez forte face aux visées pédagogiques des membres historiques du SFI à l'égard des humanistes (ou des biologistes), vus comme des élèves à éduquer. Par la suite, Gumerman restera au SFI, en tant que professeur externe et membre du conseil scientifique, et collaborera avec Joshua Epstein et Robert Axtell pour développer un modèle pour reconstruire treize siècles de changements dans le projet « Long House Valley computer simulation […] nicknamed 'Project 1050' »[383].
Cependant, Gumerman n'a pas été le seul à soulever des problèmes d'asymétrie entre les deux cultures. Dans un article de l'hiver 2007, David Krakauer relève des différences fondamentales entre les historiens et les scientifiques, mais en même temps reconnaît la possibilité de parvenir à une unification sur certains points spécifiques :

« Many of these thoughts were provoked at a meeting organized by John Gaddis and me at SFI in the summer of 2005. It became clear that while the will towards a common language was present, significant technical difficulties impeded our progress. The tendency of physical scientists is often to dismiss detail as incidental and search only for regularity. For the historian, great richness lies in the sequencing of the particular, and in the narrative plausibility of networks of causality. This, however, is also a very common preference in the biological and social sciences. Having said that […] there seems to be a level at which history and natural science is probably untranslatable. However, there are coarse-grained realities of interest to both communities, and these we felt are most evident in the history of conflict. In conflict, competing parties arise and engage in repeated interactions with a concomitant redistribution of resources »[384].

[382] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 21.
[383] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 11.
[384] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 39.

Même sous la présidence de l'anthropologue Jeremy Sabloff, l'intérêt croissant pour les SHS de la part de l'institut se fait en fonction d'un déficit épistémique de ces disciplines : « SFI is broadening and deepening its interest and engagement in the social sciences and the humanities, at a time when those fields also are reaching out in search of new tools and methods »[385]. En effet, une anthropologue italienne, postdoctorante au SFI, a étudié les sociétés humaines monogames et polygames avec l'objectif de rendre sa discipline plus rigoureuse : « She wants to transform anthropology into a science »[386]. Pareillement, l'histoire se fait quantitative et devient cliodynamique, en intégrant les MBA ou les équations différentielles :

> « Researchers involved in the field call it 'cliodynamics' after Clio, the Greek muse of history. […] Cliodynamicists would like to see the historical fields sharing methods among themselves and adopting approaches and theories from physics and other long-quantified fields. The tools of complexity science are now beginning to make the task tractable, Krakauer says. Mathematical and computational techniques such as agent-based models, power-law relations, and more classical differential-equation models are in several fields helping scientists develop new theoretical frameworks, for example »[387].

Il faut rappeler que la cliodynamique n'est pas une initiative restreinte au SFI, même si celui-ci se fait l'attracteur de ces initiatives de quantification des SHS : « Turchin is said to have coined the term 'cliodynamics' in 2003. He published a *Nature* article in 2008 introducing the field to the broader scientific community. Meanwhile, he has been a visiting scholar at SFI »[388]. Également, des articles « interdisciplinaires »[389], où les méthodes de la physique sont appliquées à d'autres disciplines, de la biologie à l'économie, sont publiés dans la prestigieuse revue *Physical Review Letters*.
Quelques expériences que nous avons eues sur le terrain aident à clarifier la vision que certains représentants des SSC américains ont des SHS, par exemple lorsqu'au SFI un physicien nous demande de faire vite lors de l'entretien (« here we work Fabrizio »), sous-entendant ainsi que le travail du sociologue n'en est pas un ; ou lorsque un physicien à Boston, après un entretien d'une demi-heure seulement, juge que nous avons suffisamment de matériau pour notre thèse et se refuse de continuer un autre jour ou via Skype ; ou encore lorsqu'un autre physicien à Boston, au cours d'un entretien tendu, nous intime d'étudier les systèmes complexes en eux-mêmes et nous congédie après 17 minutes, sans considérer l'hypothèse selon laquelle l'étude de ceux et celles qui étudient les systèmes complexes puisse avoir u quelconque intérêt.

[385] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2011, Vol. 25, p. 4.
[386] *Ibid.*, p. 37.
[387] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2012, Vol. 26, p. 20.
[388] *Ibid.*, p. 21.
[389] Les guillemets s'imposent, lorsqu'on considère que dans ces articles, les physiciens publient très souvent tout seuls, en appliquant leurs outils à des disciplines qu'ils ou elles ne connaissent pas forcément dans les détails.

On retrouve le même type d'arguments de l'autre côté de l'Atlantique, sans pour autant rencontrer le même mépris vis-à-vis des SHS tel quobservé plusieurs fois aux États-Unis. Quand nous avons demandé les raisons du succès de l'ISC-PIF à l'un de ses membres, il nous a répondu que c'est surtout parce que l'approche computationnelle appliquée aux SHS « dépoussière les SHS, comme on dit »[390]. Catherine Robert, chargée de la valorisation scientifique et de la mise en place des partenariats privés à l'ISC-PIF, explique pourquoi Patrice Bourdelais, directeur de l'InSHS du CNRS, a soutenu les SSC au début des années 2010. Elle nous a reporté les argumentations du démographe et historien à propos de la nécessité de redynamiser les SHS par l'intégration de nouveaux outils. Robert ajoute que cela lui semble un besoin face à l'arrivée de grandes masses de données :

> « Patrice Bourdelais était aussi très intéressé par ce que fait l'ISC. Quand il était venu l'inaugurer, il expliquait que les SHS étaient à un tournant où les chercheurs devaient s'approprier d'autres moyens, d'autres approches, d'autres méthodes. Il voyait là un moyen de transférer des outils et des approches particulièrement intéressantes pour redynamiser une communauté qui en a besoin, quoi. Moins en crise qu'en mutation. […] Aujourd'hui les informations se démultiplient donc il faut bien des outils pour les approcher, pour en faire quelque chose au plan scientifique »[391].

Toutefois, l'ancienne directrice adjointe de l'InSHS Sandra Laugier, précise que les SHS quantitatives ne doivent pas remplacer les SHS qualitatives et que même dans les SSC il y a du qualitatif ; d'après la philosophe, les SSC répondent à la nécessité de prendre en compte une multiplicité de facteurs afin d'expliquer des phénomènes complexes :

> « Rien ne doit rien remplacer. Il y a aussi du qualitatif dans les systèmes complexes, puisqu'il y a toujours la nécessité de déterminer quelles sont les données pertinentes et les critères qu'on va prendre dans l'analyse des données. Donc c'est plutôt la fin du tout quantitatif, comme du tout qualitatif. […] On s'est aperçu que pour avoir une connaissance aussi pertinente, il fallait prendre en compte le plus de facteurs possibles, et là c[e n]'était que les systèmes complexes qui permettaient de faire ça. […] La science des données, c'est le principe de la *phronesis* aristotélicienne, où la connaissance c'est pas de raisonner de façon pure, à partir de données très claires au départ, mais d'arriver à prendre en compte toute sorte de données auxquelles on n'avait pas pensé. […] Dès lors qu'on s'est dit que la connaissance devait être sociale, contextualisée et multifactorielle, et bien dans ce cas-là les sciences des

[390] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[391] Entretien avec Catherine Robert, 14.03.17.

systèmes complexes sont devenues, pas l'alpha et l'oméga, mais c'est devenu quand même vraiment important pour l'analyse de certains phénomènes »[392].

Les SHS apparaissent donc comme l'un des centres d'intérêt principaux du SFI et de l'ISC-PIF pour ce qui est des champs à mathématiser. Mais la formalisation s'invite aussi dans les territoires des sciences de la vie, et cela par sollicitation des écologues eux-mêmes :

> « To [the ecologist Pablo] Marquet's eye, ecology was filled with all these little studies in little areas giving little results, with no grand theories tying any of them together. But Jim Brown, Distinguished Professor at the University of New Mexico, had just shown how he was turning ecology into a quantitative, predictive science, like physics or chemistry »[393].

Du côté de l'Europe, les mathématiques sont considérées comme l'outil le plus puissant pour rendre compte des systèmes socio-environnementaux :

> « the fact that societies play such a large part in the current and future dynamics of the Earth System is responsible for the fact that the number of degrees of freedom of the system as a whole is extremely large. This means that mathematical and other solutions need to be found to deal with these kinds of systems. Wherever attempts have been made at understanding such socio-environmental systems, Complex Systems Science models have been among the most powerful tools available »[394].

Et en France, à l'aune des États-Unis, les disciplines repérées comme maîtresses sont les mathématiques, l'informatique et la physique, comme le montre ce passage de la plaquette qui présente le Campus Numérique des Systèmes Complexes, une initiative appuyée par l'UNESCO :

> « La compréhension des systèmes complexes passe par leur modélisation ; les modèles doivent fournir une reconstruction de l'ensemble des données provenant de l'observation de ces systèmes. L'activité de reconstruction est, par nature, interdisciplinaire, associant des spécialistes de disciplines formelles, mathématiques, informatiques et physiques »[395].

---

[392] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[393] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 22.
[394] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006, p. 7.
[395] CS-DC, « Le Campus Numérique des Systèmes Complexes. De la molécule à l'écosphère », plaquette de présentation, 2014, archives de Paul Bourgine.

Toutefois, dans l'expérience bruxelloise d'Hugues Bersini, le débat interne aux SSC n'oppose pas les sciences naturelles aux SHS, mais les physiciens aux informaticiens. Si selon ces derniers, catégorie à laquelle Bersini appartient, la simulation représente une preuve, les physiciens se refusent d'avoir la même opinion et cherchent des preuves mathématiques : « Il y a toujours eu cette tension. Donc, la transdisciplinarité d'accord, mais les physiciens l'emportent, ils ont cette idée qu'il faut tout écrire sous [forme d'équation] »[396]. Ceci montre que les clivages varient, selon les disciplines convoquées, selon les pays, selon les instituts et selon la composition socio-épistémique de ces derniers. Mais cela montre aussi que la formalisation de tout savoir demeure l'objectif premier et partagé par tous les représentants des SSC.
Le physicien et entrepreneur Hervé Zwirn nous a expliqué que le projet de l'Action Concertée Incitative de 2003, ayant contribué à fonder le domaine dans l'Hexagone, était une proposition pour que certaines SHS dépassent le « verbiage » qui les caractérise, en formalisant là où c'est possible de formaliser[397]. Il regrette le fait que l'ACI n'ait pas réussi « à convaincre des gens complètement réfractaires » à la formalisation « et qui font leurs recherches en littérature pure »[398]. Est-ce que, d'après Zwirn, toutes les SHS sont formalisables et doivent l'être ? « Non, je pense qu'il y a des choses qui sont difficilement formalisables »[399], répond-il. Si l'épistémologie est un exemple de discipline difficilement formalisable, et que l'économie est déjà formalisée, Zwirn explique que les organisateurs pensaient à des disciplines, comme la sociologie, la théorie de la décision ou le droit, qui ne sont pas formelles et qui peuvent le devenir. Quid du libre arbitre ? « Ça dépend des domaines »[400]. En prenant en compte les MBA, Zwirn fait des exemples de phénomènes formalisables (les mouvements de foules) et de phénomènes non-formalisables (les affects). En général, d'après lui les phénomènes collectifs sont plus faciles à simuler que les comportements individuels :

> « quand on essaie de formaliser le comportement d'agents et en particulier des humains, c'est compliqué, mais il y a une méthodologie. La première des choses consiste à essayer de mettre en évidence des règles, même probabilistes, de comportement dans les interactions que les agents ont les uns avec les autres. Parce que par définition la modélisation multi-agents est une modélisation qui part des interactions locales des individus pour faire émerger un comportement global. […] Il y a quantité de modèles sociologiques, qui font des prédictions qui parfois marchent et parfois pas, mais qui permettent de prédire des individus dans tel ou tel cas. Le comportement le plus connu c'est le comportement des piétons ou des

[396] Entretien avec Hugues Bersini, 25.05.16.
[397] Entretien avec Hervé Zwirn, 11.01.16.
[398] *Ibid.*
[399] *Ibid.*
[400] *Ibid.*

foules. […] S'il s'agit de prédire les comportements d'un individu sur le plan affectif, ça on ne sait pas faire. En revanche, quand il s'agit de choses un peu plus neutres et un peu plus collectives, on a des tas de méthodes pour arriver à essayer de deviner »[401].

Donc « il y a des cas où c'est hors de portée », mais l'ACI se proposait d'encourager des « méthodes rigoureuses, rationnelles et le plus possible formelles pour réfléchir à des problèmes qui, dans certains cas, étaient réfléchis de manière un peu plus floue ou littéraire »[402]. Le but, selon Zwirn, n'est pas gestionnaire ou entrepreneurial, mais méthodologique : « Si vous êtes un scientifique, vous cherchez à répondre à des questions de la manière la plus rigoureuse possible, sinon vous n'êtes pas un scientifique »[403]. Zwirn dit reprocher aux humanistes de refuser la formalisation dans des cas où ils ou elles pourraient bien formaliser leurs connaissances : « Lorsque, là je suis un peu extrémiste, mais il faut dire que je ne suis pas sciences humaines moi au départ, je suis physicien d'abord, mais je suis assez sévère sur les chercheurs qui se contentent de faire du verbiage quand il est possible de faire mieux »[404]. Lorsque nous lui avons demandé un avis sur un article qu'Isabelle Stengers avait co-écrit avec Michael Lissack en 2004, pour mettre en garde les physiciens ou les informaticiens face à la tentation d'appliquer leurs outils à d'autres domaines que les leurs[405], Zwirn a eu des mots durs vis-à-vis de la philosophe, en taxant ses positions d'idéologiques. Mais face à des possibles critiques de réductionnisme vis-à-vis de la démarche promue par l'ACI, le physicien a revendiqué un monisme physique (tout est régi par les lois de la physique), et en même temps il s'est dit contre le fait d'expliquer une science par une autre : par exemple la psychologie à partir de la physique quantique. Quand on transpose une technique de physique ou d'informatique à un autre domaine, selon Zwirn il faut prendre un certain nombre de précautions, en respectant les hypothèses sur les modes de fonctionnement sous-jacents au système pris en examen :

« Il faut au préalable qualifier correctement les correspondances entre certaines propriétés du domaine dans lequel vous voulez travailler, les comparer aux propriétés du domaine dont vous partez, voir si elles sont vraiment similaires ou si c'est issu d'analogies avec des grosses différences, etc. Et ce n'est qu'au prix de cette analyse que vous pouvez transposer d'un domaine à un autre. […] Il faut que des gens qui connaissent les deux domaines discutent entre eux et voient dans quelle mesure ça colle»[406].

[401] *Ibid.*
[402] *Ibid.*
[403] *Ibid.*
[404] *Ibid.*
[405] Stengers, I. & Lissack, M., « The challenge of complexity : Unfolding the ethics of science. In memoriam Ilya Prigogine », *Emergence: Complexity and Organization*, 2004, vol. 6, n. 1-2.
[406] Entretien avec Hervé Zwirn, 11.01.16.

Bourgine, pour sa part, revendique le projet de naturalisation de la phénoménologie, mais ajoute que, si le CREA avait duré plus longtemps, son projet aurait été aussi celui de « phénoménologiser la nature »[407]. Sur le libre arbitre, d'après lui « [i]l suffit de réécrire un peu Spinoza, c'est-à-dire […] voir ce qu'est Spinoza, non pas en termes de déterminisme mais en termes de déterminisme en probabilité, comme en mécanique quantique »[408]. Autrement dit, grâce aux outils numériques dont on dispose aujourd'hui, il sera possible, selon Bourgine, de prévoir de manière probabiliste les événements sociaux qualitatifs, ce qui est la base, pour lui, d'un « nouveau siècle des lumières »[409]. Dans cette optique, la quantification des SHS n'est donc pas un problème, à la seule condition de respecter la privacy dans le traitement des données personnelles :

> « aujourd'hui avec tous les réseaux sociaux, tu peux tout quantifier […] À une condition, c'est que l'on respecte exactement le nouveau règlement européen qui arrive en mai 2018 et qui est absolument fondamental. […] ce règlement dit que toutes les applications Web doivent rétrocéder à chacun ses propres données »[410].

Quant aux deux positions onto-épistémologiques qui opposaient le pôle philosophique au pôle modélisateur au sein du CREA, Bourgine dit : « Bon l'histoire… on verra, mais tant mieux s'il y a les deux positions »[411].
Beslon critique de manière virulente ceux et celles qui, dans un cadre SSC ou autre, travaillent sur une ingénierie du système de vote. Il soutient que l'on a beau concevoir le meilleur système de vote au monde, mais que si les citoyens et les citoyennes ne considèrent pas le candidat élu comme légitime, « ça ne sert à rien » ; il regrette donc l'unicité du regard informaticien et invoque le besoin du regard sociologique :

> « il y a beaucoup de gens dans les systèmes complexes qui travaillent sur le système de vote. […] je pense que ce sont des gens […] dangereux. Parce que ce sont des gens qui parlent de démocratie en ne voyant qu'un tout petit bout de ce que c'est que la démocratie. […] Ils font beaucoup de logique, de théorie du vote, pour avoir des votes plus équilibrés, plus efficaces, etc. Mais ils ne se posent pas la question, pour moi, […] fondamentale […] Si la personne […] n'apparait pas comme légitime aux yeux des gens qui l'ont élue, ça ne sert à rien. Et ça veut dire que ces

[407] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[408] *Ibid.*
[409] *Ibid.*
[410] *Ibid.*
[411] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.

gens-là, ils ont un regard quelque part d'informaticiens […] et pas du tout un regard de sociologues »[412].

Nous pouvons affirmer que cette vision des sciences est commune à la plupart des instituts de la complexité dans le monde, ou à la plupart des chercheurs et des chercheuses s'inscrivant dans le domaine des SSC. Il faut toutefois dire qu'elle nous paraît plus marquée au sein du SFI, tandis qu'en France nous observons plus de variabilité dans les positions. Si les extraits des entretiens avec Bourgine et Zwirn rappellent celles du SFI, Pumain affiche une position intermédiaire entre la leur et celle de Romain Reuillon. Ce dernier est ingénieur de recherche au CNRS, à mi-temps à l'ISC-PIF et à mi-temps à Géographie-Cité. Sans avoir étudié des manuels de géographie, il affirme avoir appris « par les codes »[413] les idées fondamentales qui lui servent pour dialoguer avec les doctorants et les postdoctorants de Pumain. Le fait d'avoir transcrit en langage informatique les objets et les hypothèses géographiques lui a permis de comprendre un certain nombre de concepts de cette discipline. L'équipe dont il fait partie se compose d'informaticiens et de géographes qui connaissent le langage les uns des autres à des degrés différents selon les individus, avec toutefois une connaissance de l'informatique de la part des géographes qui est plus grande que celle que les informaticiens ont de la géographie. Reuillon reporte que le groupe a créé de nouveaux objets informatiques, de nouveaux concepts et de nouveaux termes de manière dialogique. Une partie de ces termes et concepts ont été publiés, une partie sont d'usage « privé » au sein de l'équipe et une partie existaient déjà ailleurs : ils ont donc été introduits par un membre du collectif pour devenir d'usage commun. Ce que Reuillon a tenu à souligner, c'est que le rapport entre modélisateurs et géographes est symétrique : « Je ne me sens ni asservi ni maître »[414]. Reuillon ne dit pas vivre la collaboration comme une relation de domination de l'informatique sur la géographie, il la décrit plutôt comme un jeu gagnant-gagnant, où les informaticiens peuvent développer des nouveaux outils à partir du terrain des géographes et où les géographes peuvent bénéficier de l'expertise informatique pour tester leurs hypothèses. D'après lui, les deux côtés disciplinaires se respectent mutuellement, chacun en reconnaissant l'expertise de l'autre :

« Ce qui était cool c'est qu[e] […] dans ce projet-là il y avait pas d'instrumentalisation d'un côté par l'autre ou vice versa. […] jamais on m'aurait dit, 'Tu n'y connais rien, tu n'es pas géographe', et puis jamais je leur ai dit, 'De toute façon vous allez pas vous emmêler de ça, ça c'est l'informatique' »[415].

[412] Entretien avec Guillaume Beslon, 15.09.15.
[413] Entretien avec Romain Reuillon, 07.02.17.
[414] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[415] *Ibid.*

Son principal collaborateur, Mathieu Leclaire, confirme l'absence de conflits entre les deux camps : « Il y avait assez peu de conflits, il y a eu des discussions. […] Des discussions évidemment, mais qui ont toujours fait avancer les choses »[416]. D'après Leclaire, chaque groupe reconnaissait à l'autre sa compétence dans son domaine d'expertise, et les dialogues se faisaient sur un fond de confiance et d'amitié, « [ce] qui fait qu'on a pu travailler hyper bien ensemble »[417].
Par contre, deux éléments font comprendre que la *culture épistémique* informatique a tout de même une primauté. Le premier concerne l'aspect « boite-noire » de certaines parties du logiciel à usage des géographes : les modélisateurs étaient là pour développer des scripts sur lesquels leurs collègues humanistes n'étaient pas autonomes, ou bien pour leur indiquer les limites du développement informatique :

> « Quand je suis en désaccord, explique Reuillon, j'ai l'impression de faire mon boulot. […] les moments que je trouve intéressants c'est quand je peux leur apporter un truc ou je leur réduis l'espace des possibles […] Par exemple quand je peux dire, 'Quoi que vous fassiez, votre modèle ne peut pas faire ça. On peut la raconter comment on veut mais là si vous faites ça, il y a forcément ça comme conséquence et forcement pas ça comme conséquence' »[418].

Le deuxième aspect c'est que les géographes sont capables de coder d'eux- ou d'elles-mêmes[419]. Certains, comme Sébastien Rey, ont un parcours d'informaticien et sont devenus géographes ensuite ; d'autres, comme Clémentine Cottineau, sont des géographes ayant appris à coder de manière autonome, même si sans la finesse et le degré de complexité d'un informaticien professionnel :

> « Au début, explique Reuillon, c'était beaucoup de répétition mais c'est normal faire passer des éléments. Mais à la fin je n'avais besoin de ne rien préciser sur la manière dont marchait l'algo. Les conclusions ils savaient les faire tout seuls, les

[416] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[417] *Ibid.*
[418] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[419] Pumain explique que cela n'a pas été toujours le cas : « On a fonctionné […] séparément pour les deux premiers Simpop [la plateforme MBA de modélisation de villes que l'UMR a produit à partir des années 1990], puisque ça s'est fait avec des informaticiens qui étaient en thèse avec lesquels on avait autant d'interactions que possible, mais […] on ne pouvait pas contrôler véritablement ce qui avait été mis en détail dans le code […] [C'était difficile] pour une dissonance d'objectifs entre la thèse d'informatique et celle en géographie. Ils ne voulaient pas se laisser instrumentaliser, ce qui est aussi compréhensible. En même temps c'étaient des thésards qui parfois avaient leur petite idée sur le fonctionnement économique des villes et qui tranchaient une hypothèse sans nous en parler, on découvrait après coup. Aujourd'hui on est dans le gagnant-gagnant, c'est-à-dire que le travail informatique qui est fait pour nous sert à faire avancer la plate-forme de simulation des informaticiens et on a travaillé pas à pas, c'est-à-dire que les chercheurs qui étaient en thèse, les géographes […] ont travaillé au quotidien ensemble avec [les informaticiens] en mettant les mains dans le cambouis du code, donc en se comprenant parfaitement. […] Ensuite quand on a dû définir des fonctions-objectifs pour permettre le calibrage du modèle on a aussi décidé ensemble quels étaient les critères qui devaient être choisis, comment les calculs devaient se faire […] on a réglé tous les détails ensemble. Ça veut pas dire qu'on sait programmer comme font les informaticiens » : entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.

personnes avec lesquelles on a fait tout ça sont capables de réutiliser les outils informatiques »[420].

Si, tout en restant en France, on quitte la géographie et on en vient à une collaboration entre physiciens, biologistes et informaticiens, nous observons la même tendance. La physicienne Annick Lesne[421] explique que, dans un tel travail interdisciplinaire, sa tâche est de modéliser les données des biologistes, tandis que les informaticiens transforment son modèle mathématique et conceptuel dans une simulation informatique. Sans les informaticiens, dit Lesne, « on ne pouvait pas aller trop loin »[422]. À première vue, leur support semble surtout quantitatif et instrumental, subordonné à l'œil expert et théorique des « thématiciens » biologistes et physiciens. Toutefois, dans la suite de notre entretien, Lesne nous a expliqué que dans un certain sens le dernier mot reste aux informaticiens, qui éclairent les thématiciens sur les choses informatiquement possibles et les choses infaisables[423].

L'importance de la biologie

Le quatrième type de discours que nous allons examiner est mené surtout par le SFI et constitue un élément fondamental de l'*horizon de rétrospection* du centre. C'est inscrit dans le terme « adaptatif » de la formule « complex adaptive systems » : Charles Darwin, ou une certaine lecture de ses œuvres. Au début de l'histoire de l'institut américain, ce sont surtout Stuart Kauffman et John Holland qui parlent souvent de Darwin dans leurs recherches. Pourtant la théorie de l'évolution sert de toile de fond à la plupart des travaux du SFI, jusqu'à aujourd'hui. Dans le compte-rendu d'un livre d'Ernst Mayr sur Darwin, Thomas Kepler, à l'époque un postdoctorant de l'institut, arrive à considérer le biologiste britannique comme un précurseur des SSC[424]. L'intérêt du SFI pour l'évolution est, par ailleurs, illustré par l'organisation de plusieurs projets de recherche sur cette thématique[425] et par le genre de questions que l'institut se pose : « To what extent are social organizations an extension of biology? »[426]. Une brochure dédiée à présenter le « réseau » *ACtioN*, un dispositif fournissant un support scientifique à des entreprises cotisant à l'institut, est l'occasion pour corroborer le lien du SFI avec Darwin face aux entreprises qui financent le laboratoire. La brochure prend pour exemple la théorie de l'innovation comme l'un des domaines d'application de la loi du plus fort :

[420] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[421] Directrice de recherche au CNRS et rattachée au Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée de l'Université Pierre et Marie Curie. Elle a participé aux premiers pas dans le lancement des SSC en France aux côtés de Bourgine.
[422] Entretien avec Annick Lesne, 03.04.15.
[423] *Ibid.*
[424] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 16.
[425] Par exemple, SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. B.
[426] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, p. 2.

> « We believe that just as Darwin's theory describes evolutionary processes in biology, so too might a Theory of Innovation describe the emergence and survival of novelty across the technological, social, and biological domains. […] Through empirical, modeling, and theoretical research, we seek a quantitative, possibly predictive theory of novelty »[427].

Certains membres du SFI se sont penchés sur la question des inégalités socio-économiques, en tenant un discours où, au nom de la complexité, parmi les raisons à prendre en compte dans l'affaire, l'aspect génétique est également inclus :

> « Researchers at SFI and elsewhere are finding that this country does indeed have a surprisingly large amount of inherited inequality. But contrary to what one might think, the inheritance of economic success isn't the result merely of families passing down wealth to their children. It involves little noted factors such as personality and health »[428].

Dans cette étude, Samuel Bowles et ses collaborateurs se sont attaqués à l'idée reçue selon laquelle chaque génération est la seule responsable de son succès ou de son insuccès[429]. La conclusion de l'étude de cette équipe est que les gènes pourraient jouer un rôle dans la détermination des inégalités, tandis que l'éducation ne compterait que pour moins de la moitié dans ce qui est des causes environnementales :

> « [The team], while stressing the large margin of error in the estimates, nonetheless conclude[s] that the twin data suggest that genes may play a significant role in the transmission process. Their second conclusion is that environmental effects are significant, and that less than half of the estimated environmental effect can be accounted for by educational differences »[430].

Darwin est associé à Adam Smith. Deux visions épistémiques se font d'emblée politiques : ce qui les lie est une même métaphysique de l'humain et de la société. La main invisible est donnée comme un postulat, non seulement en économie mais aussi en politique : comme le dit l'économiste et entrepreneur John Miller, il ne reste que la dévoiler avec les nouveaux modèles numériques :

> « Miller says one aim of his modeling work is to expose the 'invisible hand'. […] Smith's metaphoric hand is the imperceptible force that sets a price equilibrium

[427] SFI, « ACtioN. Applied complexity network @ the Santa Fe Institute », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
[428] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. B.
[429] *Ibid.*, p. C.
[430] *Ibid.*, p. F.

when the quantity of a good such as corn or a common stock equals the quantity in demand. 'It is remarkable to watch a bunch of sleepy students meander about in an experimental market and act as if there were some centralized force guiding their actions', says Miller. 'But we don't yet have a coherent explanation for how this happens'. Miller finds the invisible hand at work in many kinds of social phenomena, even in one of the most baffling human behaviors : politics. Just as Darwin's finches evolved to prosper and survive on the Galapagos Islands, Miller thinks a form of the invisible hand guides political parties in a democracy to win elections »[431].

Si les sciences « dures » dominent les sciences « molles », à l'intérieur des premières une autre hiérarchie s'opère : la physique et l'informatique dominent la biologie (ce qui n'empêche pas, évidemment, l'informatique de s'inspirer de la biologie de temps à autre[432]). Le biologiste Daniel McShea le dit clairement : « As a biologist, I've been forced to speak in someone else's language. Physics and computer science are the languages here. It's been extremely painful – and useful »[433]. Et c'est intéressant de voir les entrelacements entre tous ces gestes onto-épistémologiques car, après avoir physicalisé le biologique, les géographes quantitatifs physicalisent le social par le biais du biologique physicalisé. Ainsi, ils parlent de « métabolisme social » des villes :

« In an attempt to discover whether cities consume energy in the same way as biological organisms […] Bettencourt […] West, and their colleagues from Arizona State University and the Dresden University of Technology found that the size of a metropolis not only affects energy consumption, but also the pace at which people work, earn, walk, spend, and steal. Their study […] lays out scaling laws that appear to connect cities of different sizes and in different nations. The most surprising of these laws suggests that a city may have a social metabolism that, as the city grows, increases faster than the population itself »[434].

Après avoir montré que l'une des régularités des villes concerne les économies d'échelle à l'égard des infrastructures – une route est plus rentable dans une grande

[431] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 16.
[432] Un exemple de biologisation de l'informatique est la recherche de Stephanie Forrest, élève de John Holland, sur les systèmes de défense des ordinateurs : « Forrest and her colleague at University of New Mexico, David Ackley, have a revolutionary view of the world of computers. They see it as a living system. 'This ecosystem of computers, with people, software, data, and programs has many of the properties of a living system', says Forrest. She and Ackley spend a great deal of time exploring those similarities and figuring out how to draw from that analogy in order to produce stronger systems […] [In particular] Forrest took the notion of pattern recognition. She thought she could build the equivalent in the computer, translating those biological algorithms into computer algorithms » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1, p. 17.
[433] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 6.
[434] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 4.

ville que dans une petite, car il y aura plus d'usagers face au même investissement –, ils tissent un parallèle entre villes et systèmes biologiques au nom d'une métaphore :

> « This mirrors a relationship seen in biological organisms, where large animals economize on blood vessels by pumping more blood through proportionally fewer veins and capillaries. Fewer vessels support more mass, but the large animal's metabolism slackens because the blood is delivered more slowly. When a city grows, the highways deliver more people to and from their destinations, but traffic slows as the roads become congested »[435].

L'homogénéité épistémique, ontologique et idéologique des membres du SFI est assez frappante, par rapport au cas européen où plus de variabilité est observable. La prosopographie des membres de l'institut étatsunien confirme la dominante physico-computationnelle, mathématique et biologique. Les fondateurs du SFI sont tous des physiciens ou des chimistes. Les premiers membres actifs sont des biologistes, des économistes et des informaticiens. Des prises d'information à des moments différents de l'histoire du centre confirment la tendance. En 1992, par exemple, la liste des nouveaux membres du conseil scientifique incluera un économiste, un informaticien, un anthropologue, un biologiste moléculaire, un bio-informaticien, deux mathématiciens et cinq physiciens[436]. En 2001, la plupart des étudiants de premier cycle, ainsi que la majorité des chercheurs et chercheuses temporaires et permanents, sont issus de la physique (11), de l'informatique et/ou des mathématiques (8), des sciences de la vie (4), de l'économie (2) et de la socio-informatique (1)[437].
Il ne faut pourtant pas oublier de mentionner les exceptions. Moore tient par exemple à souligner que les métaphores biologiques exportées en économie naturalisent les marchés plus qu'ils ne le doivent :

> « [Cris] Moore notes that metaphors imported from biology into economics may distort impressions of the economy by making it seem more natural than it really is. 'The economy isn't a jungle', Moore says. Economic systems have governments, which are not present in the rain forest »[438].

Souvent les exceptions, surtout lorsqu'elles sont polémiques, confirment la règle. L'encadré 2, intéressant en soi pour comprendre ce qui constitue l'identité métholodogique des SSC, représente une illustration ultérieure de la dominante physico-computationnelle darwinienne de la démarche des spécialistes de la

[435] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 7.
[436] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, pp. 32-33.
[437] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, pp. 22-24.
[438] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2, p. 29.

complexité. On peut y voir que, sur treize outils que nous avons reperés, un est issu de l'économie, quatre de la physique et huit de l'informatique ou de la bioinformatique.

Encadré 2. Les outils des SSC entre emprunts et originalité : une question d'identité

Les outils, les approches et les méthodologies constituent quelques-uns des éléments dont est fait un domaine de savoirs, à côté des individus, des techniques, des institutions et des financements. L'identité méthodologique et opérationnelle des SSC se compose d'un certain nombre d'outils, qui sont à la fois des sous-domaines de recherche ou des paradigmes locaux : nous les avons repérés à partir du croisement de plusieurs sources (bulletins du SFI, écoles d'été du SFI, feuilles de route franco-européennes, conférences du RNSC, sites Internet de plusieurs instituts de la complexité, entretiens, etc.) et nous avons retenu ceux qui reviennent le plus souvent, depuis les années 1980 jusqu'à aujourd'hui, en excluant ceux qui ne sont utilisés qu'occasionnellement.

Avec les outils les plus en vogue dans les SSC, nous sommes face à un paradoxe, notamment par rapport à l'ambigüité du déjà-là et du encore-à-faire, ou du à-venir. Par exemple, dans le deuxième numéro des bulletins du SFI, le vice-président des affaires académiques Mike Simmons écrivait que le but primaire de l'institut devait être celui d'appliquer les outils des disciplines traditionnelles, ainsi que les instruments numériques émergents, aux problèmes des systèmes complexes[439]. De même, dans la feuille de route européenne, éditée par Bourgine et Johnson, à la fois on donne la science des systèmes complexes comme un acquis déjà existant et défini, dont on connaît toutes les potentialités et les succès, et pourtant on exhorte à la formation d'une communauté qui développe ses propres outils[440]. Ce qui est sûr, c'est que les boites à outils d'où puiser pour des vieux et des nouveaux outils sont toujours bien identifiées en trois domaines des sciences dures : « mathematics, computer science and statistical physics can bring new formalisms for representing complex systems dynamics in an elegant and useful way »[441].

Il y a un deuxième paradoxe quant aux origines de ces outils. La plupart d'eux proviennent d'autres disciplines établies – physique statistique, physique des systèmes dynamiques, informatique, bioinformatique, économie – et là ils continuent à vivre et à évoluer, si ainsi peut-on dire, et cela même après l'appropriation de la part des SSC. Sauf l'exception représentée par les MBA développés par Christopher Langton sous le nom de vie artificielle, où l'on peut considérer que le SFI a généré un outil relativement nouveau, tous les autres ont été conçus en dehors de l'institut, souvent bien avant sa fondation. Cependant, souligner l'origine externe des outils des SSC n'est pas finalisée à minimiser l'originalité de ce domaine – ce qui n'est pas un jugement très intéressant pour nous, dans tous les cas. Cela va sans dire que l'opération d'emprunt est aussi une opération de réappropriation, de réinterprétation et de renouvellement, et qu'il concerne bien d'autres domaines du savoir depuis toujours. Les outils sont retravaillés, étendus, développés dans des cadres et sur des objets habituels ou inédits. Parfois les chercheurs et chercheuses se réclamant des SSC renouvellent des méthodes empruntées à d'autres domaines ou simplement appartenant à leur propre discipline, et en constituent une version différente, qui s'ajoute à celles existantes en dehors du champ de la complexité. Les communautés des MBA et de la théorie des réseaux, par exemple, sont plus vastes que celle des SSC, avec laquelle d'ailleurs elles ne se superposent pas de manière complète. Dans d'autres cas, comme dans la physique statistique, le label « systèmes complexes » est parfois critiqué, regardé avec méfiance ou simplement ignoré[442].

Pragmatiquement nous avons regardé ce que les personnes, disant travailler sur les systèmes complexes, font dans leur quotidien de recherche. La liste des outils que nous proposons ici a été construite surtout par le SFI dès le départ de son histoire et surtout à partir de la première école d'été qu'il a organisé dans la deuxième moitié des années 1980 – véritable lieu de concrétisation de ces techniques et sous-domaines de recherche.

[439] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 2.
[440] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006, p. 8.
[441] *Ibid.*, p. 14.
[442] Entretien avec Giambattista Giacomin, 13.01.16.

Nous les retrouvons, avec une géométrie variable, dans les autres instituts de la complexité autour du monde, mais la plupart de ces centres – à partir du SFI – se veulent ouverts à l'intégration ou au développement de nouvelles méthodes.
En 1986-1987, les éléments constitutifs des SSC, selon le SFI, sont les automates cellulaires, les systèmes dynamiques chaotiques, la complexité computationnelle, les réseaux neuronaux, les verres de spin, les algorithmes génétiques, les réseaux booléens[443]. Si l'on demande à un membre important du SFI aujourd'hui de nous donner la liste des outils les plus utilisés par ses collègues, il nous fournit la liste suivante :

> « It is hard to say exhaustively : statistical mechanics, game theory, information theory, machine learning and statistical learning, network theory, microeconomics, dynamical systems, control theory, epidemiological models, agent based models, stochastic systems. So quite different from the old list…
> In addition there is a set of people that come more from the social sciences and use several methods of comparative data analysis and statistics. Economic and social theory (not a method so much as a framework) and of course computational modeling »[444].

Si nous nous tournons vers la France, Jean-Philippe Cointet, chercheur à l'INRA et ancien membre de l'ISC-PIF, repère trois grandes boîtes à outils au sein de la communauté des systèmes complexes française[445]. D'abord, les mathématiques des systèmes dynamiques ; Bourgine le rejoint, en considérant le *Handbook of Dynamical Systems*[446] comme une référence obligatoire au sein de l'ISC[447]. Ensuite, d'après Cointet, très utilisées sont les méthodes provenant de la physique statistique. La troisième boite à outils est représentée par l'ensemble des théories de l'analyse des réseaux. Cointet repère plusieurs origines à ce domaine : la théorie des graphes (Paul Erdős et Alfréd Rényi[448]), la physique des réseaux dynamiques (Duncan Watts et Steven Strogatz[449]), l'étude des réseaux invariants d'échelle (Albert-László Barabási et Réka Albert[450]) et l'étude des réseaux sociaux (Mark Granovetter[451]).
La lecture de la feuille de route de la communauté des SSC française[452] montre encore une fois la centralité des mathématiques des systèmes dynamiques et de la physique statistique pour les phénomènes non-linéaires (qu'ils soient microphysiques ou sociopolitiques), puisqu'elles y sont citées explicitement au moins dix fois. Ensuite sont mentionnés la géométrie fractale, les verres de spin, les réseaux de neurones, la thermodynamique et les algorithmes épidémiques.
Les Quatrièmes Rencontres Nationales du RNSC, qui se sont tenues à Mulhouse en octobre 2014, nous ont montré que, sur dix-neuf contributions, la théorie des réseaux était citée sept fois, les MBA quatre fois (trois contributions et un atelier de formation), les méthodes statistiques quatre fois, la théorie des graphes quatre fois et les systèmes dynamiques trois fois.
Ces exemples, qui auraient pu être ultérieurement enrichis en prenant en compte d'autres conférences et d'autres instituts, suggèrent une idée de la variabilité des méthodes selon les pays, les contextes et les

---

[443] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, pp. 8-13 ; SFI, « A proposal to Develop a Broad Research Program on the Sciences of Complexity at the santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico. August 24, 1987 », boîte d'archives « SFI Concepts Mission Statements 1984-1989 ».
[444] Mail de Luis Bettencourt, 04.06.14.
[445] Entretien avec Jean-Philippe Cointet, 05.05.14.
[446] Hasselblatt, B. & Katok, A., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 1A*, Amsterdam, North Holland, 2002 ; Katok, A. & Hasselblatt, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 1B*, Amsterdam, North Holland, 2005 ; Fiedler, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 2*, Amsterdam, North Holland, 2002 ; Broer, H., Takens, F. & Hasselblatt, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 3*, Amsterdam, North Holland, 2010.
[447] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[448] Erdős, P. & Rényi, A., « On the evolution of random graphs », *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, n. 5, 1960, pp. 17–61.
[449] Newman, M.E.J., Strogatz, S.H. & Watts, D.J., « Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications », *Physical Review E*, n. 64, 2001.
[450] Barabási, A.-L. & Réka, A., « Emergence of scaling in random networks », *Science*, n. 286, 1999, pp. 509–512.
[451] Granovetter, M., « The Strength of Weak Ties: A Network Theory Revisited », *Sociological Theory*, n. 1, 1983, pp. 201-233.
[452] Bourgine, P. et al., E., *French Roadmap for Complex Systems*, *op. cit.*

époques. Notre liste, qui n'est pas exhaustive, se propose de mettre brièvement en perspective la parution et la diffusion des outils les plus souvent employés par les représentants des SSC. Ces outils peuvent être à la fois des techniques issues de certaines disciplines, ou bien des spécialités à part entière, ou bien des théories. En outre, il y a souvent des recoupements entre les éléments de notre liste, certains étant des spécialités ici et à la fois des outils pour une autre spécialité là-bas.

Systèmes dynamiques
Les historiens et les scientifiques appartenant à ce domaine repèrent les débuts des mathématiques des systèmes dynamiques dans les travaux d'Henri Poincaré, Pierre Duhem, Jacques Hadamard et Andreï Kolmogorov, publiés entre le XIX^{ème} siècle et la première moitié du XX^{ème}. On identifie ensuite dans la théorie du chaos l'espace socio-épistémique dans lequel des physiciens, des mathématiciens, des chimistes, des climatologues ont développé nombreux autres outils et se sont penchés dans un travail de convergence sociodisciplinaire, le domaine n'existant pas en tant que tel jusqu'à la fin des années 1960. La sensibilité aux conditions initiales, les transitions de phase, les équations différentielles, les fractales, le chaos déterministe, les attracteurs (étranges ou autres), les systèmes dissipatifs sont quelques-uns des termes que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature sur les systèmes dynamiques. Au début de l'histoire du SFI, c'est surtout cette boîte à outils qui donne une identité aux membres de l'institut et qui attire les premiers financements. Aujourd'hui, les mathématiques des systèmes dynamiques sont un outil acquis et considéré comme nécessaire pour l'analyse des autres outils présents dans notre liste.

Physique statistique
Également appelée mécanique statistique, cette branche de la physique théorique a été développée par le professeur américain de physique mathématique Josiah Willard Gibbs dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle. La théorie de la probabilité y est employée pour étudier le comportement moyen d'un système mécanique dont l'état exact est incertain. Elle est au début utilisée pour expliquer le comportement thermodynamique de systèmes tels que les gaz. Ses techniques, qui ne cessent d'être renouvelées et étendues depuis sa fondation, sont employées pour tous ces systèmes, y compris biologiques et sociaux, dont le niveau microscopique est inconnaissable ou inutilisable pour comprendre le niveau macroscopique. Il s'agit de l'un des sous-domaines des SSC où on emploie le plus le concept d'émergence, pour indiquer l'imprévisibilité ou la non-déductibilité de l'état global du système à partir de l'étude de ses composants. Sa présence à l'intérieur des SSC est documentée depuis le début jusqu'à aujourd'hui. Si le terme de système complexe est assez utilisé dans cette spécialité, nombreux physiciens statisticiens regardent avec soupçon les SSC, car méfiants envers les applications de leurs techniques à des systèmes non-physiques.

Verres de spin
Développés surtout au cours des années 1970 par plusieurs physiciens de la matière condensée américains et européens, les verres de spin sont définis comme des systèmes magnétiques désordonnés. L'origine du comportement magnétique de nombreux matériaux réside dans la propriété mécanique quantique des électrons, qui s'appelle « spin », c'est-à-dire rotation. Le terme de « verre » se réfère à l'état de la matière qui est à mi-chemin entre le liquide et le solide : les modèles mathématiques et numériques de ces systèmes sont en effet dynamiques et ont trouvé des applications dans plusieurs domaines, de l'étude des réseaux (biologiques, sociaux, etc.) à celle des protéines, en passant par le champ de l'optimisation (recherche opérationnelle, ingénierie). Très présents au début de l'histoire du SFI et des SSC en général (un chercheur important a été Giorgio Parisi, physicien italien proche des communautés américaines et européennes des SSC), ils sont assez marginaux aujourd'hui et absents de la plupart des centres et des conférences sur les systèmes complexes.

Automates cellulaires
Développés à partir des années 1940 par Stanislaw Ulam et John von Neumann, les automates cellulaires sont des outils employés en mathématique et en informatique, se composant d'une grille régulière de cellules qui peuvent avoir un état parmi une série finie de possibilités. Les cellules évoluent simultanément de manière discrète ou digitale au cours du temps, en suivant des règles de fonctionnement général, l'état de chaque

cellule influençant et étant influencé par ses voisines. Très étudiés dans la première moitié de vie du SFI par un petit groupe de chercheurs et de chercheuses, le scientifique le plus connu dans ce domaine de recherche est le physicien et entrepreneur britannique basé à Boston, Stephen Wolfram. Aujourd'hui les automates cellulaires sont de moins en moins utilisés dans les instituts et dans les conférences inscrits dans les SSC, ayant été supplantés par les MBA et les réseaux.

Réseaux neuronaux
Conçus par les cybernéticiens Warren McCulloch et Walter Pitts dans les années 1940, ils ont été développés par Donald Hebb dans la même décennie, par Frank Rosenblatt dans les années 1950, par les cognitivistes de l'Intelligence Artificielle Marvin Minsky et Seymour Papert dans les années 1960, puis par John Hopfield et Terry Sejnowski dans les années 1980. Devenus l'un des outils des sciences cognitives et du *deep learning* pour leur capacité de simuler l'apprentissage, les réseaux neuronaux se composent d'un certain nombre de couches de synapses virtuelles, où les sorties d'une couche constituent les entrées d'une autre. Très présents aux débuts de l'histoire des SSC, les réseaux de neurones sont peu utilisés aujourd'hui dans la communauté et beaucoup plus en ingénierie et informatique.

Réseaux booléens
Inspirés des réseaux de neurones, les réseaux d'automates booléens aléatoires ont été développés par Stuart Kauffman dans les années 1960[453]. Dans son article séminal, Kauffman propose un parallèle entre l'évolution des cellules et l'évolution aléatoire de ses réseaux, en suggérant que l'évolution des organismes vivants pourrait être le fruit du hasard. Cet outil est censé modéliser le passage du génome au phénotype qui, dans la cellule, a lieu par le biais de l'interaction entre les protéines. Les gènes booléens sont des dispositifs binaires régis par les seize fonctions de Boole. Rarement utilisés au sein des SSC, ils ont eu des applications en biologie pour modéliser la régulation des réseaux génétiques.

Algorithmes génétiques
Mis au point par l'informaticien John Holland dans les années 1970, les algorithmes génétiques sont des modèles évolutifs computationnels, qui se basent sur les principes de la variation génétique et de la sélection naturelle. D'un point de vue théorique, il s'agit d'une simulation numérique des systèmes biologiques et écologiques. En informatique et en recherche opérationnelle, leur but applicatif est celui de trouver une ou plusieurs solutions à des problèmes donnés. Cela en faisant évoluer une population de solutions par une démarche d'essai et erreur qui prime les bits gagnants et élimine les bits inefficaces. Assez peu utilisés dans les SSC aujourd'hui, les algorithmes génétiques ont trouvé une application dans le domaine de l'optimisation : y compris quand ils sont utilisés par des représentants des SSC, ils résultent le plus souvent comme des outils appliqués à d'autres plateformes numériques que comme des logiciels de simulation des systèmes complexes naturels et humains. Holland a développé au sein du SFI une variante des algorithmes génétiques, à savoir les systèmes de classeurs, afin d'étudier les systèmes complexes : cette méthode est répandue en intelligence artificielle et en mathématique.

Modèles à base d'agents (vie artificielle)
Les modèles à base d'agents (MBA) et les systèmes multi-agents (SMA) ont deux origines historiques différentes. Les premiers ont été développés entre les années 1970 et 1990 par Thomas Shelling, Christopher Langton et Robert Axelrod, afin de simuler des sociétés humaines et d'organismes vivants, tandis que les seconds ont été développés dans les années 1980 et 1990, en France par Jacques Ferber, pour résoudre des problèmes informatiques. Dans les deux cas il s'agit de logiciels de simulation composés de nombreux agents en interaction, qui évoluent dans un environnement préconfiguré par le codeur. Si les SMA ont été d'abord employés en informatique pour accomplir des tâches spécifiques, les MBA ont toujours eu d'abord une visée de recherche. Aujourd'hui les deux méthodes se chevauchent, surtout au sein de la communauté des SSC. Les communautés des MBA et des SMA dépassent largement celle des systèmes complexes, où ils sont les outils les plus utilisés avec les réseaux. La vie artificielle n'est que l'un des courants présents à l'intérieur de ce

[453] Kauffman, S.A., « Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Constructed Genetic Nets », *Journal of Theoretical Biology*, vol. 22, n. 3, 1969, pp. 437-467.

double domaine, qui est comme une sorte d'animal à deux têtes.

Criticalité auto-organisée
Développée par les physiciens Per Bak, Chao Tang et Kurt Wiesenfeld dans les années 1980, la théorie de la criticalité auto-organisée inclut des techniques de physique statistique, qui visent à rendre compte des comportements invariants d'échelle comme les formes fractales des plages, des nuages, des paysages et de bien d'autres phénomènes. Elle est appliquée à des systèmes dynamiques qui possèdent un point critique qui fait d'attracteur du système et qui stabilise le système de manière autonome au fur et à mesure que celui-ci s'approche de la criticalité. Bak a été longtemps associé au SFI depuis le début des années 1990, sur invitation de Philip Anderson. La SOC (de l'acronyme anglais *self-organized criticality*) a bénéficié d'un grand succès au cours des années 1990 et des premières années 2000, en étant appliquée à de nombreux domaines (géophysique, cosmologie, biologie évolutive, sociologie, etc.). Ses applications diminuent depuis que la théorie a été plusieurs fois critiquée.

Théorie des réseaux
Issue de la rencontre entre la théorie des graphes, la physique des réseaux dynamiques, l'étude des réseaux invariants d'échelle et l'étude des réseaux sociaux, la théorie des réseaux s'est développée au cours des années 1990-2000 et ne cesse de monter en puissance depuis. Ses applications à de nombreux domaines augmentent : de la physique statistique à la sociologie, en passant par l'étude de l'Internet et des écosystèmes. Ce domaine, qui probablement peut déjà être considéré comme une spécialité à part entière, semble avoir de plus en plus de crédit, au point de s'accaparer, avec les Big Data, l'espace, les communautés et les financements qui avaient été des SSC dans la première décennie 2000. Un réseau se compose de plusieurs nœuds interconnectés par des liens ou arêtes et peut être étudié avec des techniques mathématiques différentes, issues notamment de la physique statistique, des mathématiques, de l'informatique ou de l'épidémiologie.

Théorie des jeux
Conçue par John von Neumann dans les années 1940, la théorie des jeux s'intéresse aux jeux à somme nulle (gagnant-perdant) ou à somme non-nulle (gagnant-gagnant). Le prototype s'appelle le « dilemme du prisonnier », une situation dans laquelle deux individus gagneraient à coopérer. Si le prisonnier A dénonce le prisonnier B, il obtiendra une réduction de pène à condition que l'autre ne le dénonce pas. Les deux gagneraient en même temps, si aucun des deux ne dénonçaient l'autre. Les modèles mathématiques développés pour étudier les jeux trouvent des applications en économie, en sciences politiques, en psychologie, en logique, en informatique, en biologie, etc. C'est l'un des premiers outils à avoir été mobilisés par le SFI et ça l'est encore aujourd'hui dans les SSC en général.

Complexité computationnelle
La théorie de la complexité computationnelle est un domaine de recherche à part entière, comme la physique statistique ou la théorie des réseaux. Elle est notamment une branche de la théorie de la computation en informatique théorique. Parue entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 à partir des travaux d'un certain nombre d'informaticiens (Juris Hartmanis, Richard Stearns, Manuel Blum, Stephen Cook), ce domaine étudie la quantité de ressources computationnelles, de mémoire et de temps qui servent à résoudre un problème informatique. La théorie des graphes, les machines de Turing, le problème P=NP, la physique statistique et bien d'autres outils et mesures sont tout autant des éléments de cette théorie de la complexité. Abordée par quelques personnes du SFI depuis le début des années 1990 à aujourd'hui, cette théorie est très rarement mentionnée dans les espaces institutionnels des SSC.

Apprentissage machine
L'expression *machine learning* a été forgée par l'informaticien américain Arthur Samuel en 1959. Aujourd'hui c'est un domaine de l'informatique qui utilise des techniques statistiques pour créer des algorithmes capables d'« apprendre » et de « prévoir » de manière autonome à partir de l'analyse des données dont ils disposent. Présent de manière marginale dès le début de l'histoire du SFI, les techniques de

l'apprentissage machine ne cessent de se répandre dans les domaines de l'intelligence artificielle, de l'ingénierie industrielle, des Big Data et bien sûr des SSC.

En 2012, un groupe de chercheurs et de chercheuses de l'IXXI a publié une étude scientométrique sur une large base de données d'articles ayant le terme « systèmes complexes » dans les mots-clés[454]. Avec une base de données issue de 215 mille articles, sélectionnés sur la base d'un certain nombre de mots-clés spécifiques concordés avec des spécialistes des domaines impliqués, les auteurs montrent que les outils des SSC les plus communs relèvent du numérique – les références les plus citées étant des manuels mathématiques et informatiques. Les auteurs de cet article montrent en outre quelles sont les communautés les plus importantes qui utilisent les mots-clés de la complexité : leur liste est plus longue que celle que nous avons proposée. En même temps certains des domaines détectés par les auteurs ne font qu'un dans notre liste – par exemple : *chaos, attractors, fractals* vont sous le terme de « systèmes dynamiques » – tandis que d'autres coïncident avec des objets d'étude – par exemple : *epilepsy* ou *diabetes*.

Conclusion

Les quatre discours que nous avons décrits dans ce chapitre ne sont pas étanches les uns par rapport aux autres. S'ils s'entrelacent constamment, ils ne sont pas les seuls en présence au sein des SSC. On aurait pu parler de la conviction métaphysique de certains à propos de la nature mathématique du monde (le cerveau calculerait des équations différentielles lorsqu'on traverse la rue), ou on aurait pu écrire de l'idée de l'émergence et des multiples échelles qui composent les systèmes complexes. Nous avons choisi de traiter ces quatre discours, non seulement parce qu'ils reviennent souvent dans nos matériaux, mais aussi parce qu'ils permettent d'éclairer tout le reste de cette thèse.

Un terrain ethnographique pour suivre pas à pas les collaborations interdisciplinaires qui sont menées dans les instituts de la complexité devra être conduit pour mieux spécifier les relations entre les *cultures épistémiques* différentes à l'œuvre dans ce domaine. Ce que nos matériaux d'archives et nos entretiens nous permettent de montrer, c'est que le rapport de « domination » de la physique, de l'informatique, des mathématiques et du darwinisme envers les autres savoirs n'a pas (toujours) besoin de s'exercer par un travail d'*emprise* actif et plus ou moins explicite d'une partie au détriment de l'autre. Souvent, au contraire, les non-informaticiens recherchent l'expertise des informaticiens, pour s'y « soumettre » de manière spontanée, assumée et raisonnée, ou alors ils apprennent ou connaissent déjà, à des niveaux différents, le langage informatique, à tel point qu'ils arrivent à être partiellement ou complètement autonomes dans le développement des logiciels de modélisation. Dans le cas des épidémiologistes computationnels, nous avons des physiciens qui apprennent à coder au même niveau que des informaticiens et qui, par cela même, se transforment en épidémiologistes : nous le verrons dans le chapitre 15.

[454] Grauwin, S. et al., « Complex Systems Science », *op. cit.*

En outre, le rapport des « thématiciens » avec les informaticiens n'est pas celui d'une simple requête de service. On pourrait penser au cas paradigmatique des radiologues effectuant les datations par carbone 14 pour le compte de paléontologues ou d'archéologues : les SSC ne mettent pas en place des relations de service de ce type. Dans ce genre de prestations, les visions épistémologiques et les visions ontologiques des paléontologues et des archéologues restent sous leur contrôle. Dans le cas des SSC, les disciplines autres que l'informatique et la physique sont obligées de soumettre leurs objets et leurs modèles à la vision physico-computationnelle, si elles veulent étudier leurs systèmes par le biais de la simulation numérique. Le dialogue entre *cultures épistémiques* différentes est sans doute observable ; n'empêche qu'il n'est pas symétrique – admis que cela soit possible – car les outils et les cadres de l'informatique et de la physique finissent par recentrer les questions et par reconfigurer les présupposés onto-épistémologiques des autres disciplines. Le philosophe de la « pensée complexe » Edgar Morin a critiqué l'approche issue du SFI – qualifiée de « complexité restreinte » – pour son manque de réflexivité épistémologique[455]. En réalité, la réflexion épistémologique est présente au sein des SSC, bien que pas dans le sens prôné par Morin : elle prend le chemin de l'informatique, de la physique et des mathématiques. Par formation ou par volonté, les non-informaticiens sont prêts à repenser les systèmes qu'ils ou elles étudient, si cela n'est pas déjà le cas dès le départ de leur réflexion.

[455] Morin, E., « Complexité restreinte, complexité générale », *op. cit.*

Chapitre 3 – La « science de la complexité » : une histoire du Santa Fe Institute

Introduction

L'histoire de la fondation des sciences de la complexité, domaine presque uniquement computationnel, constitue un excellent terrain pour enquêter sur le rapport entre l'ordinateur et le travail scientifique interdisciplinaire. L'histoire du SFI et des SSC nous permet de déconstruire toute vision simplificatrice qui verrait dans le seul essor de l'ordinateur la cause de tout. C'est la propension suivie, dans un article sur les systèmes complexes, par les historiens Sam Schweber et Matthias Wächter qui soutiennent qu'avec l'ordinateur les sciences subissent une nouvelle « révolution à la Ian Hacking », comme ils l'appellent :

> « That the computer has similarly generated a sweeping transformation of the social, material, economic and cultural context is evident – think only of the transformation of the workplace and the novel routinisations that the computer has introduced, of e-commerce, of the new classes of professionals, etc. »[456].

Ce type de révolution dépasserait la rupture de paradigme décrite par Kuhn : elle transforme, selon les auteurs, les pratiques scientifiques de plusieurs disciplines, impliquent la création de nouvelles institutions pour supporter le nouveau type de sciences et véhiculent une nouvelle vision du monde. Mais leur article ne porte pas sur la caractérisation de la révolution en cours lié au numérique, il se concentre plutôt sur l'un de ses composants :

> « we focus on one of its components, which for lack of a better name we call the 'complex systems computer modelling and simulation' revolution, for complexity has become one of our buzzwords and *mathematical* modelling and simulation *on computers* constitute, we claim, its style of reasoning »[457].

Selon Schweber et Wächter le « Santa Fe Institute est probablement la manifestation institutionnelle paradigmatique de ce point de vue »[458]. Dans une telle optique, l'apparition de l'institut américain, la fondation des sciences de la complexité, ainsi que la diffusion des simulations numériques comme *style de raisonnement*, sont imputées à l'ordinateur, seul capable de produire une nouvelle révolution scientifique

[456] Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *op. cit.*, p. 585.
[457] *Ibid.*
[458] *Ibid.*, p. 588.

et culturelle au sens large. Une telle vision dépossède les êtres humains d'un quelconque pouvoir de décision, dépolitise les technosciences et passe sous silence les résistances et les contingences. Raconter les détails de l'histoire du Santa Fe Institute (SFI) et du lancement de la « science de la complexité » contribue à déconstruire et dénaturaliser ce type de lectures, très répandues en dépit de leur réductionnisme intrinsèque à la fois chez les scientifiques et chez les spécialistes des sciences.

Faire une histoire du SFI

Les rares histoires du SFI qui existent – exception faite de celles de Stephen Helmreich[459] et Lambert Williams[460] – sont le produit de journalistes enthousiastes ou de scientifiques ayant fait partie de la sphère d'influence de l'institut. Il en résulte des histoires partielles et partiales, voire hagiographiques, qui ignorent nombre de figures clés dans le développement de l'institut, ainsi qu'un certain nombre de documents, que l'on peut consulter dans les archives publiques et institutionnelles du centre. En racontant le récit de cet institut de recherche, nous allons nous appuyer sur un matériau socio-historique jamais exploité auparavant. Celle-ci n'est pas conçue comme la seule histoire possible du SFI, car elle passe par un certain nombre de choix méthodologiques et narratifs. Nous avons agencé la première sous-partie de ce chapitre en nous inspirant fortement de l'histoire sociale et culturelle, telle qu'elle a été initiée par l'historien Dominique Pestre[461] et appliquée par les historiens Pierre-Olaf Schut et Matthieu Delalandre[462] pour retracer la montée et le déclin de la spéléologie en France. Plusieurs historiens, sociologues et politistes ont mis en lumière le caractère mouvant des frontières de ce qu'on appelle, souvent à tort, une discipline[463]. Si un nouveau domaine de recherche se compose d'un ensemble de pratiques, de techniques, d'institutions et d'identités sociales vouées à l'étude d'un certain nombre d'objets, l'approche sociohistorique vise, tout d'abord, à rendre compte de l'articulation entre ces éléments, en examinant les *voies de la légitimation scientifique*[464]. L'histoire et la sociologie des sciences sont riches de textes qui abordent la question de l'émergence d'un domaine technoscientifique. Bien que le modèle de l'article classique de Nicholas Mullins sur la biologie moléculaire ait été critiqué, il porte une directionnalité, voire

[459] Helmreich, S., *Silicon Second Nature. Constructing Artificial Life in a Digital World*, Berkeley & Los Angeles, University of California Press, 1998.
[460] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*
[461] Pestre, D., « Pour une histoire sociale et culturelle des sciences », *op. cit.*
[462] Schut, P.-O. et Delalandre, M., « L'échec d'une discipline : montée et déclin de la spéléologie en France (1888-1978), *Revue d'histoire des sciences*, vol. 1, tome 68, 2015, pp. 81-107.
[463] Par exemple : Favre, P., « Retour à la question de l'objet : Ou faut-il disqualifier la notion de discipline ? », *Politix*, n. 29, 1995, pp. 141-157 ; Leclerc, M., « La notion de discipline scientifique », *Politique*, 1989, n. 15, pp. 23-51 ; Rose, H., Rose, S. & Hanmer, J., Enzensberger, H.-M., Franck, R., Lévy-Leblond, J.-M. & Stéhelin, L., *L'idéologie de/dans la science*, Paris, Seuil, 1977 ; Stengers, I. (ed.), *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*, Paris, Seuil, 1987 ; Lemaine, G., Macleod, R., Mulkay, M., Weingart, P., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, The Hague, Mouton & Co. & Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1976 ; Darbelley, F. (ed.), *La circulation des savoirs. Interdisciplinarité, concepts nomades, analogies, métaphores*, Berne, Peter Lang, 2012.
[464] Schut, P.-O. et Delalandre, M., « L'échec d'une discipline », *op. cit.*, p. 85.

une téléologie, qui est souvent sous-jacente aux modèles courants de sociologie et histoire des disciplines. Mullins écrit en effet :

> « Paradigm development occurs when a group of persons, either together or separately, experience a 'Gestalt shift' which changes their perception of the topic or topics they are analysing. Their subsequent research uses this new perception, and some of that research is then published. Success in solving some problem is necessary to justify this shift, and the developing area must point to interesting problems for further research. Further successes may eventually enable the new approach to establish itself as normal science in Kuhn's sense. The puzzle-solving activity of normal science then continues from that point »[465].

Mullins identifie quatre étapes dans l'émergence d'un nouveau domaine de recherche : 1) celle de la formation du « groupe paradigmatique », où des scientifiques, inspirés par les mêmes lectures, commencent à travailler sur un sujet commun sans être entrer en relation ; 2) celle de la formation d'un « réseau social lâche » et d'une première homogénéisation du vocabulaire, dans laquelle les scientifiques publient sur le nouvel objet d'étude, se reconnaissent, se contactent et peuvent coécrire des articles ; 3) celle du « regroupement », où les acteurs se reconnaissent entre eux, commencent à tracer des frontières et à créer les premières institutions nécessaires à pérenniser le domaine ; 4) celle, enfin, de l'« institutionnalisation » du domaine, par la mise en place de processus de formation et de recrutement dans des rôles relevant de cette spécialité. Dans notre recherche sur les SSC, nous n'avons pas relevé grand-chose correspondant à ce modèle. Les sciences de la complexité ont été fondées avant même que leurs représentants puissent brandir des théories ou des résultats scientifiques, voire un paradigme unifié (qui n'existe toujours pas). Autrement dit, l'institutionnalisation a précédé les contenus épistémiques, elle a été mise en place pour les produire. Donc, si la fondation de la biologie moléculaire semble se faire, d'après le récit de Mullins, plutôt de manière ascendante que descendante, dans le cas des SSC le processus d'émergence est plus difficile à retracer, plus confus et enchevêtré.

Comment les SSC sont-elles devenues computationnelles ?

Raconter cette histoire dans le cadre des *voies de légitimation* n'implique pas de délaisser les contenus épistémiques. Cela veut dire, au contraire, montrer les jeux d'influences réciproques entre différents facteurs : cognitifs, idéologiques, de politique scientifique, de disponibilité technique, sociale, économique, architecturale, même géographique. La trajectoire des SSC dépend fortement, au début de son histoire, de la

[465] Mullins, N.C., « The development of a scientific specialty : The phage group and the origins of molecular biology », *Minerva*, 1972, vol. 10, n. 1, pp. 51-52.

trajectoire du SFI : les deux coïncident pendant quelques temps[466]. Et cette trajectoire est faite de décisions instables, sa direction rebondit selon les contingences, elle se déplace et s'éloigne plusieurs fois des objectifs initiaux des fondateurs de l'institut. Ceux-ci ont profité des éléments épistémiques disponibles autour d'eux, ils ont réajusté les objectifs selon les contextes, et, pour utiliser une métaphore qui plairait au SFI, ils ont su s'adapter aux contraintes de l'environnement. Autrement dit, nous observons tout sauf une direction intentionnelle, logique, cumulative et progressive dans le développement des SSC ; ce que nous observons en revanche, c'est un ensemble de projets descendants et de concrétions ascendantes, incrustés d'événements aléatoires et contingents. Il reste à comprendre comment les SSC sont-elles venues se constituer en tant que domaine computationnel. Les archives montrent clairement que l'origine de ce domaine a, précisément, une démarche à la fois descendante, ascendante et contingente. Descendante, parce que les fondateurs s'étaient accordés dès le début sur le fait que l'ordinateur aurait dû être central dans les recherches de leur institut interdisciplinaire. Ascendante, parce que ce sont des acteurs précis tels que John Holland, Christopher Langton, Doyne Farmer et quelques autres, qui ont réussi à imposer leurs travaux de simulation comme étant ce qui fait l'identité de l'institut. Contingente, enfin, parce que la présence de ces chercheurs l'est ; mais aussi parce que ce sont les résidents des maisons entourant le SFI qui, pour des raisons de sécurité et d'environnement, lui ont empêché de monter des laboratoires de sciences naturelles. C'est un tel empêchement qui a matériellement contraint les membres de l'institut à se spécialiser sur la simulation numérique. Ne serait-ce qu'à la lumière de ce bref résumé, l'on voit bien comment le modèle de Mullins ne pourrait pas être applicable à l'étude de notre objet.

Nature de l'objet d'étude et structure du chapitre

La difficulté historiographique concernant les SSC nous sépare non seulement de l'approche de Mullins, mais aussi avec un point lié au travail de Schut et Delalandre. En suivant Pierre Favre[467], ces deux auteurs affirment vouloir retracer la trajectoire de la spéléologie, définie comme une discipline organisée « autour d'un ensemble d'objets empiriques relatifs aux grottes »[468]. C'est une belle formule, mais de notre côté nous avons du mal à caractériser synthétiquement l'ensemble d'objets autour desquels les SSC s'organisent. Par conséquent, notre focale sur les stratégies de légitimation montre comment celles-ci parviennent à faire exister et rendre crédibles des objets socio-épistémiques multiples, hétérogènes et mouvants. C'est pour cela que dans le premier chapitre de l'intermède nous reviendrons sur le statut social et épistémique des SSC, en les qualifiant non pas comme une discipline, comme une

[466] Sans oublier les individus et groupes isolés ailleurs dans le monde qui plus tard se rallieront à la mouvance de la complexité, en revendiquant d'en être les pionniers avant ou en même temps que le SFI.
[467] Favre, P., « Retour à la question de l'objet », *op. cit.*
[468] *Ibid.*, p. 82.

spécialité ou encore comme une interdiscipline[469], mais plutôt comme un *carrefour* ou une *plateforme méta-disciplinaire*, sur laquelle des chercheurs et des chercheuses de différents champs scientifiques s'appuient pour mener des luttes dans leur propre champ d'appartenance. Mais avant d'en arriver là, il faut revenir sur les origines de la mise en place de cette plateforme.

Ce chapitre se compose de deux sections.

1) Ce qui nous occupera dans la première section, ce sont les stratégies que les fondateurs du SFI ont utilisées pour fonder et légitimer les SSC. Puisque tout élément d'un domaine de recherche se retrouve dans une dynamique processuelle – bien que certains aspects renvoient plus d'inertie que d'autres[470] – les SSC ne peuvent être appréhendées que par ce que les scientifiques font et disent en leur nom. Les actions menées et leurs conséquences constituent notre matériau empirique. Nous avons pu consulter les archives internes du SFI entre le 19 septembre et le 7 octobre 2016, après avoir passé en revue tous les numéros du bulletin du SFI (voir encadré 3) de manière à préparer ce terrain sur le sol américain. Nous avons conduit en outre plusieurs dizaines d'interviews avec des scientifiques liés à l'institut, interrogés en Europe ou aux États-Unis, ou bien par Skype.
2) Dans la deuxième section de ce chapitre, nous proposerons une périodisation de la vie institutionnelle du SFI. Cela fournira une vision synoptique de l'histoire de ce centre tout en permettant d'expliciter des liens causaux.

Encadré 3. Les archives

Bulletins du SFI

Le SFI a publié 40 numéros de son Bulletin entre 1986 et 2014. Dans le premier numéro[471], on lit que cette publication est trimestrielle et qu'elle s'adresse aux membres du conseil d'administration[472], aux agents de recherche, aux conseillers, aux chercheurs et chercheuses, aux donateurs passés et potentiels, ainsi qu'aux dirigeants universitaires, industriels et gouvernementaux. Son rôle est d'informer ce public à propos des programmes scientifiques et administratifs de l'institut[473]. Du fait de son coût éditorial, le rythme de publication se veut déjà moins ambitieux dès le deuxième numéro, qui se dit biannuel[474] : le bulletin n'arrivera jamais à trois numéros par an et souvent il ne sera publié qu'une fois par an. Toujours distribué gratuitement et imprimé en cinq milles copies, il était disponible sur requête auprès de l'éditeur ou de l'institut ; plus tard la publication est devenue électronique et tous les bulletins, y compris les précédents, sont devenus des documents PDF

[469] Frickel, S., « Building an interdiscipline : Collective action framing and the rise of genetic toxicology », *Social Problems*. 2004, vol. 51, n. 2, pp. 269-287.

[470] Winner, L., « Do Artifacts Have Politics? », *Daedalus*, 1980, vol. 109, n. 1, pp. 121-136 ; Bourdieu, P., « Le mort saisit le vif. Les relations entre l'histoire réifiée et l'histoire incorporée », *Actes de la recherche en sciences sociales*, avril/juin 1980, vol. 32-33, pp. 3-14.

[471] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, p. 2.

[472] Celui-ci se compose d'un minimum de cinq et un maximum de quarante-cinq membres, qui sont élus par le conseil et qui restent pour une période de trois ans, renouvelables. Le conseil d'administration détermine « la mission et la finalité de l'Institut, en sélectionnant le Président et en collaborant à la selection du staff exécutif » : SFI, « Bylaws of the Santa Fe Institute. Santa Fe, New Mexico. As amended on November 3, 2013 », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».

[473] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 2.

[474] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 2.

disponibles sur le site du SFI. Le bulletin a changé de forme plusieurs fois. Le tout premier numéro est fait dans un style rudimentaire, tandis qu'à partir du deuxième il s'approche du format des magazines de médiation scientifique. Si les informations relatives aux changements administratifs, aux membres académiques et aux donateurs resteront presque tout au long de la vie de la publication (elles disparaîtront du bulletin dans les dernières années de publication, de 2007 à 2014, pour être déplacées dans l'*Annual report*), les comptes rendus des workshops des tout premiers numéros s'accompagneront vite d'articles de vulgarisation sur les activités et sur les thématiques portées par le centre. Le style alléchant de la présentation graphique et du contenu hagiographique des personnalités liées à l'institut, ne cessera de s'amplifier d'année en année, en fonction notamment publicitaire. Cela témoigne du besoin d'attirer des nouveaux donateurs, mais aussi d'entretenir ceux qui le sont déjà, souvent des scientifiques retraités fortunés à la recherche d'activités pour l'esprit. En effet, les discours et la promotion de l'institut seront, même si implicitement, toujours tiraillés entre le pôle international et le pôle local de la ville de Santa Fe. Petite ville du Nord du Nouveau Mexique, elle abrite nombre des anciens chercheurs et anciennes chercheuses des laboratoires aux alentours de Santa Fe (LANL, Sandia, Université du Nouveau Mexique, le couloir technologique du Rio Grande[475]), mais aussi des artistes, des entrepreneurs, des anciens PDG, provenant de tous les États-Unis et attirés par ce lieu chaud et paisible. En 2013, dans l'antépénultième volume (n. 27), on lit une synthèse de l'histoire du bulletin et une déclaration d'intentions importante :

> « The *SFI Bulletin* began 27 years ago as a mimeographed review of people and events contributing to SFI science. Since then it has transformed several times, ranging from a quasi journal containing scholarly review articles to an accessible magazine for SFI's diverse audience. Today, with this issue, the *SFI Bulletin* is changing again. We now present the publication in three ways : as a tablet magazine and as an online publication, with a few printed copies found primarily at the Institute. We will publish three issues a year rather than one. Instead of surveying a half dozen research themes, each issue now covers a single scientific theme. And, to offer the greatest possible relevance to our audience of scientists and nonscientists, we offer several perspectives, asking our scholars to present their work in their own words »[476].

Le numéro ne sera jamais publié trois fois par an et ne sera plus publié à partir de 2015. Le responsable des médias nous a expliqué que les bulletins coûtaient trop cher (25.000 dollars), pour peu de lecteurs, surtout comparé aux supports Internet, bien plus économes[477].

Archives internes du SFI

Sauf les archives des donateurs privés, les archives internes du SFI sont accessibles assez facilement. Elles remplissent plusieurs dizaines de cartons, comblant nombreuses étagères dans un coin de la bibliothèque. Lorsque nous n'étions pas en train d'interviewer un membre du staff ou un scientifique, nous avons passé notre temps à photographier les contenus de ces archives. Nous n'avons pas tout photographié dans chaque boite, ni avons pris en considération la totalité des boites, mais nous considérons avoir pu copier plus du 90% du matériau disponible. Nous avons totalisé 48 boites (listées dans la bibliographie de cette thèse), qui vont de la correspondance du premier président George Cowan aux statuts du SFI, du matériau promotionnel à des affiches, des rapports scientifiques pour les agences fédérales financières aux notes issues des réunions des conseils d'administration, de la transcription de la réunion fondatrice aux papiers liés à l'acquisition du campus à Hyde Park. Ce riche matériau nous a permis de croiser énormément d'informations avec celles issues du bulletin et d'autres publications du et sur le SFI, mais aussi d'en trouver des inédites.

D'autres documents

Le bulletin n'est pas la seule publication périodique du SFI. Existent aussi : *Parallax*, une newsletter conçue en 1989[478] et maintenant présente uniquement en ligne, focalisée plus sur les contenus scientifiques ; l'*Update*, une brochure de quatre pages avec un aperçu des activités, publications et événements du centre ; et l'*Annual*

[475] Pines, D. (ed.), *Emerging Syntheses in Science*, *op. cit.*, p. 13.
[476] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2013, Vol. 27, p. 4.
[477] Entretien avec John German, 23.09.16.
[478] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 4.

Report, avec des informations plus détaillées sur les corps professoraux et sur l'état des finances. Nous avons utilisé ces publications de manière moins systématique.

Stratégies de légitimation : bâtir un domaine de recherche de toutes pièces

Historiquement, le SFI n'est pas le premier groupe social à avoir revendiqué l'étude des systèmes complexes ou de la complexité dans le monde scientifique. Au Centre de Recherche en Epistémologie et Autonomie de l'École Polytechnique de Paris, fondé en 1982, il est déjà question de complexité, bien qu'en référence à la tradition cybersystémique ; en 1986 Stephen Wolfram fonde son Center for Complex Systems Research à l'Université de l'Illinois[479] ; peu après la fondation du SFI qui prit au début le nom de Rio Grande Institute, et en même temps que son démarrage réel (1987-1988), un certain nombre de scientifiques liés à l'institut de Santa Fe, dont Peter Carruthers et Harry Swinney, sont impliqués aussi dans la fondation d'un Center for Interdisciplinary Complex Systems, puis renommé Center for the Study of Complex Systems à l'Université de l'Arizona[480]. En Europe, plusieurs scientifiques (Gérard Weisbuch, Denise Pumain, Hughes Bersini, Giorgio Parisi, Luciano Pietronero) utilisaient le terme de complexité ou de systèmes complexes avant les années 1980 ou revendiquent avoir été à l'origine du domaine des SSC avant ou en même temps que le SFI[481]. Si Helmreich déclare « notorious » le fait que les récits américains (de la vie artificielle, en l'occurrence) excluent ou marginalisent les précédents européens et

[479] Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16 ; « And indeed some of the phenomena I had discovered were starting to be used as the basis for a new area of research that I called complex systems theory » : Wolfram, S., *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p. 20.

[480] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 11 ; SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 13 ; SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 4 ; le physicien Harry Swinney nous a indiqué Alan Newell comme quelqu'un pouvant être informé des faits, et Newel nous a répondu ainsi : « the center about which you speak probably arose as an offshoot of activities in Los Alamos. In the 1980's, everybody and his brother was starting up such centers. It was the fashion. Most did little of real significance except they were great at holding meetings » : mail d'Alan Newell, 09.03.17.

[481] Bersini relate avoir revendiqué la paternité des premières recherches sur les systèmes complexes pour son école d'appartenance, celle afférente à Ilya Prigogine à l'Université Libre de Bruxelles : « Alors Santa Fe c'est très particulier parce que je vais te dire, Santa Fe, moi j'ai toujours été, alors en même temps très attiré par Santa Fe. Et en même temps extrêmement critique de la… lorsque tu t'intéresses à des histoires des systèmes complexes, Santa Fe, ils ont tout à fait réécrit l'histoire des systèmes complexes en les faisant démarrer à Santa Fe. Or, quand tu étais à Bruxelles dans les années 1980 et que tu connaissais bien le laboratoire de Prigogine, il faut savoir que le laboratoire de Prigogine dans les années 1980 après son prix Nobel, c'était pratiquement une centaine de personnes qui travaillaient sur les sociétés d'insectes, […] le cerveau chaotique […] l'économie complexe […] la sociologie, la physique des systèmes complexes et c'était hyper-transdisciplinaire […] T'avais vraiment des biologistes, des sociologues, des philosophes […] c'était une période extraordinaire, tu vois ? Et on était […] [au] début des années 1980. Et donc quand Santa Fe s'écriait en disant : 'Nous arrivons avec l'approche interdisciplinaire des systèmes complexes etc.', je me rappelle que moi j'étais furieux. Et je me rappelle que […] quand on a organisé la deuxième conférence […] [sur la vie artificielle], ou la troisième, je ne sais plus laquelle c'était, à Bruxelles et je me rappelle que j'ai ouvert mon talk […] en disant, 'Je vais rétablir l'histoire, c'est Bruxelles qui a d'abord été l'institut des systèmes complexes et puis Santa Fe mais pas l'inverse', parce que les gens, surtout les américains tu vois, ils avaient fait une espèce d'effaçage historique en mettant tout à fait Bruxelles à l'écart » : entretien avec Hugues Bersini, 25.05.16.

latino-américains[482], Pumain rapporte une explication fournie par un des premiers membres du SFI, Brian Arthur, d'origine irlandaise :

> « j'ai rencontré au SFI Brian Arthur. On a évoqué ce parallélisme des histoires et le peu de communication entre le SFI et les écoles européennes. L'analyse de Brian Arthur, que je l'ai interviewé sur ces questions-là, c'est de dire : je n'ai jamais réussi à les faire inviter au SFI. […] et pourquoi les américains n'en parlent pas ? 'Because it was not invented here' »[483].

Toutefois, le SFI est la première institution qui, de manière stratégique et prioritaire, travaille à donner corps au nouveau domaine de recherche qu'elle appelle « *science of complexity* ». Le caractère explicite et engagé de cette entreprise motive le choix de retracer l'histoire de cet institut plutôt que celle des autres centres.

Complexity, un fameux livre de vulgarisation, écrit par le journaliste scientifique Mitchell Waldrop, a déjà retracé les premières années de vie du SFI[484]. Publié en 1992, il raconte les premières années du centre, un morceau d'histoire qui va des réunions fondatrices tenues en 1983 à Los Alamos par une douzaine de physiciens du LANL jusqu'aux premières recherches menées par le SFI entre la fin des années 1980 et le début des années 1990. Pour écrire son livre, Waldrop s'est appuyé sur une série d'entretiens avec un nombre limité de membres[485] et a choisi un style de vulgarisation scientifique, plutôt héroïsant que symétrique. Le livre a été mal accueilli par certains membres du SFI, qui s'y voyaient sous-représentés. D'un point de vue historique, en outre, les sources utilisées apparaissent lacunaires. Méthodologiquement, enfin, il se classe dans une médiation scientifique promotionnelle (Waldrop n'a reçu aucune aide financière par le SFI, ce n'est pas son soutien sincère qui est en cause ici[486]). À la lumière de cela, il nous faut poursuivre l'histoire du SFI, pour couvrir les années qui n'ont jamais été racontées, mais aussi pour proposer une réécriture des premières années. Nous disposons de sources plus diversifiées et une méthodologie sociohistorique plus précise. Mais rappelons brièvement les contenus des quelques publications ayant contribué à fonder une certaine mythologie du SFI. Parmi ces textes figure non seulement celui de Waldrop mais aussi les articles et les livres écrits par des fondateurs ou des membres de l'institut. Nous examinerons, par la suite, les stratégies hétérogènes que les fondateurs et leurs alliés ont mises en place pour bâtir la légitimité du domaine des SSC, en analysant onze éléments[487] des *voies de légitimation* identifiés

[482] Helmreich, S., *Silicon Second Nature*, *op. cit.*, pp. 10-11.
[483] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[484] Waldrop, M.M., *Complexity*, *op. cit.*
[485] Entretien avec Mitchell Waldrop, 02.12.16.
[486] *Ibid*.
[487] Schut et Delalandre pour la spéléologie ont repéré, parmi les éléments contribuant à sa création socio-institutionnelle : les textes fondateurs, les sociétés savantes, les revues spécialisées, les congrès, les enseignements, les commissions du CNRS (ou des institutions de recherche équivalentes), les

pour ce champ de recherche : le rôle des médias et de la vulgarisation, le prestige des fondateurs, les contacts avec les agences fédérales et les grandes entreprises, les dispositifs éducatifs (écoles d'été et d'hiver, et les *MOOC*), les workshops intégratifs et les collaborations scientifiques qui en sortent, les publications scientifiques (livres et articles), les journaux spécialisés, les projets pédagogiques dans les écoles, les prix scientifiques, les sociétés savantes, et enfin les conférences pour la communauté locale de Santa Fe.

Nota bene : Lorsque nous parlons de SFI et nous le traitons comme un tout, nous entendons parler de toutes les sphères de son existence sociale : le conseil scientifique, le conseil d'administration, le staff, les chercheurs et les chercheuses internes et externes de courte ou de longue durée, les avocats et architectes qui les ont accompagnés, et à partir d'une certaine époque aussi les entités (ONG, agences fédérales et surtout entreprises) qui font partie du *Business Network*, récemment renommé *ACtioN*. Lorsque nous nous référerons à l'une de ces catégories en particulier, nous la citerons explicitement – à moins qu'elle ne soit évidente à partir du contexte.

Encadré 4. La définition de systèmes complexes

Une des idées reçues sur les sciences veut qu'une discipline soit organisée autour d'un objet d'étude dont la communauté possède une définition partagée. Cependant, il suffit de prendre en compte la biologie pour voir que les biologistes ne s'accordent pas sur la définition de la vie, ou la psychologie pour voir que les psychologues ne s'accordent pas sur la définition de l'intelligence ou des émotions. Dans le cas des SSC, qui ne peuvent pas être décrites comme une discipline, ce problème de la définition de l'objet d'étude est encore plus marqué. Cet encadré montre trois choses. La première est qu'il existe une définition de systèmes complexes plus ou moins consensuelle pour les membres du SFI et des SSC en général, lorsqu'ils ou elles sont obligés de s'accorder sur une seule formule. Nous l'illustrerons par le livre de Melanie Mitchell, une source parmi beaucoup d'autres allant dans le même sens, et par celle plus articulée de son maître John Holland. La deuxième est que la manière dont le SFI parle de la complexité relève souvent plus d'un concept personnifié ou d'une propriété qualitative de n'importe quel phénomène que d'un objet d'étude à proprement parler. La troisième section de cet encadré montre comment, selon les cultures épistémiques des adhérents aux SSC, la définition opérationnelle de systèmes complexes varie beaucoup, car chacun met en avant des aspects plutôt que d'autres.

Définition consensuelle au SFI
La définition que Mitchell donne d'un système complexe est la suivante :

> « a system in which large networks of components with no central control and simple rules of operation give rise to complex collective behavior, sophisticated information processing, and adaptation via learning or evolution. (Sometimes a differentiation is made between complex adaptive systems, in which adaptation plays a large role, and nonadaptive complex systems, such as a hurricane or a turbulent rushing river. In this book, as most of the systems I do discuss are adaptive, I do not make this distinction.) »[488].

laboratoires/centres de recherche, les clubs et les fédérations d'amateurs. La liste n'est pas exhaustive et la pertinence varie selon le domaine étudié.
[488] Mitchell, M., *Complexity. A Guided Tour*, Oxford, New York, Oxford University Press, 2009, p. 13.

Il s'agit d'une définition largement partagée non seulement par les membres du SFI en général, mais aussi par les chercheurs et les chercheuses qui, ailleurs dans le monde, se réclament des SSC. Elle condense la définition plus articulée, et plus ancrée sur l'outil des algorithmes génétiques, de John Holland. Le premier workshop sur les systèmes complexes adaptatifs ou *complex adaptive systems* (CAS), organisé par Jack Cowan et Marcus Feldman dans l'été 1986, rassemblait des biologistes des populations, des physiciens théoriques, des psychologues, des informaticiens, des mathématiciens et des politologues. Les CAS y étaient définis comme des « systèmes composés de grands nombres d'éléments couplés, dont les propriétés sont modifiables à partir des interactions environnementales. […] les systèmes complexes adaptatifs sont hautement non-linéaires et sont organisés sur un grand nombre d'échelles spatiales et temporelles »[489]. Quelque soit l'inventeur et/ou l'introducteur de la formule de CAS (Cowan, Gell-Mann, Holland ?), Holland en devient l'usager le plus emporté. Dans le deuxième numéro du bulletin du SFI, l'informaticien donne sa définition des CAS, qui devient ainsi canonique pour la plupart de l'histoire du SFI[490]. Avant tout, il s'agit de systèmes qui apprennent, évoluent et manifestent des propriétés émergentes. Ensuite, les CAS possèdent une organisation hiérarchique, les niveaux étant construits par blocs et ces blocs étant sélectionnés par compétition dans une population de candidats. En outre, les CAS interagissent avec l'environnement selon une logique de jeu où chaque action mène à un bénéfice potentiel. Les CAS doivent s'adapter aux niches de l'environnement avec différentes stratégies, qui ne sont nullement contrôlées par le haut ou par un centre. Les CAS sont aussi régulés par un compromis entre exploration et exploitation des niches. Au niveau des interactions entre les composants d'un CAS, Holland affirme que les configurations internes des systèmes se forment par une coévolution non-linéaire, et non pas par une somme de valeurs assignées à chaque composant. Les interactions compétitives entre composants produisent des phénomènes de symbiose, de parasitisme et d'exclusion. Il y a des composants généralistes (qui exécutent plusieurs tâches) et des composants spécialisés. Souvent les mêmes sous-systèmes qui composent les CAS peuvent s'adapter à des niches différentes. Voilà, résumée en quelques points, tout le projet épistémico-politique du SFI, qui unit Darwin, von Hayek et l'écologie, et sur lequel nous reviendrons plusieurs fois dans le reste de cette thèse.

Systèmes complexes ou complexité ?

Surtout dans les dix ou quinze premières années du SFI, et plus rarement dans les SSC en général encore aujourd'hui, on parle de la complexité comme si elle était une entité au sens propre. Or, cela n'est pas exactement la même chose que de parler de systèmes complexes, ni sémantiquement, ni épistémologiquement, ni ontologiquement. La complexité devient ainsi, non pas une propriété subjectivement attribuée aux objets, mais une entité métaphysique qui agit, qui a des effets tangibles et qui forge le monde. Elle semble être une entité avec une vie propre, non pas un résultat ou un état de choses reconnu épistémiquement ; plutôt un point de départ ou un moteur démiurgique. Nous ne donnerons qu'un exemple issu d'un article de Brian Arthur publié sur *Scientific American* et reporté par le bulletin de l'hiver 1994 :

> « Complexity is indeed a marvel when it evolves naturally and delivers powerful performance. But when we seek it as an end or allow it to go unchecked, it merely hampers. It is then that we need to discover the new modes, the bold strokes, that bring fresh simplicity to our organizations, our technology, our government, our lives »[491].

Les systèmes complexes selon les cultures épistémiques

Ayant demandé la définition des systèmes complexes à chacun de nos interlocuteurs, il apparaît que les formules variaient selon leur culture épistémique. Nous allons des définitions minimales et épistémiques, comme celle d'un informaticien devenu économiste : « I sometimes define it as systems where it's hard to define the dynamics »[492], à celles plus ontologiques qui mettent en relief un attribut plutôt qu'un autre, tel que l'émergence dans le cas de ceux et celles qui travaillent dans les sciences de la vie – par exemple une

[489] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, p. 11.
[490] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, pp. 8-10.
[491] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 5.
[492] Entretien avec Blake LeBaron, 14.09.16.

bioinformaticienne donne la suivante : « I consider complex systems to be those that have multiple interacting components, with some characteristic behavior or structure that emerges from those interactions that is not immediately obvious from studying the components in isolation »[493] – ou telle qu'une régularité dans la diversité, dans le cas de ceux et celles qui travaillent dans les sciences sociales – par exemple une géographe donne la suivante :

> « [Complexes sont ces systèmes] composés d'un grand nombre d'éléments en interaction et dont les évolutions sont conditionnées réciproquement par l'environnement avec une des trajectoires à la fois irréversibles et qui peuvent connaître des bifurcations, mais qui ont malgré tout quelque structure repérable, quelques attracteurs identifiables »[494].

Le rôle des médias et de la vulgarisation

Nombreuses sont les publications, sous forme d'articles ou plus souvent de livres grand-public, qui ont jeté les bases du discours épistémique du SFI ou qui ont raconté des fragments de son histoire et des théories qui y ont été développées. Plus que des éléments de littérature secondaire, ce sont des histoires indigènes[495] : elles forgent ou contribuent à entretenir une mythologie particulière du SFI, peint comme un centre innovant et libre, rêveur et expérimentateur, rempli de génies et où tout est possible. En outre, ils font le portrait d'un lieu, si ce n'est pas *le* lieu, de l'interdisciplinarité et de la science de la complexité.

Le premier livre qui traite brièvement de quelques personnalités liées au SFI est *Chaos* du journaliste du *New York Times* James Gleick[496]. Publié en 1988, le succès de ce texte inspirera Waldrop et d'autres à faire de même, en se concentrant uniquement sur le SFI. En 1992, outre le livre de Waldrop, le journaliste Roger Lewin publie *Complexity*[497], qui a un style narratif assez proche de celui de Gleick et de Waldrop. Les théories de l'institut y sont présentées sous forme de récits ancrés autour de quelques personnes : c'est le dernier exemple de livre hagiographique. Ensuite c'est le tour de *The Origins of Order* de Stuart Kauffman[498], *Complexification* de John Casti[499], *How the Leopard Changed Its Spots* de Brian Goodwin[500] et du livre de Murray Gell-Mann[501], *The Quark and the Jaguar*[502], tous des livres plus centrés sur les

[493] Entretien avec Melanie Moses, 27.03.15.
[494] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[495] Feuerhahn, W., « Instituer les neurosciences sociales », *op. cit.*
[496] Gleick, J., *Chaos*, *op. cit.*
[497] Lewin, R., *Complexity. Life at the Edge of Chaos*, New York, Macmillan Publishing Company, 1992.
[498] Kauffman, S., *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1993.
[499] Casti, J.L., *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*, New York, Harper Collins Publishers, 1994.
[500] Goodwin, B., *How the Leopard Changed Its Spots. The Evolution of Complexity*, New York, Charles Scribner's Sons, 1994.
[501] Gell-Mann semble être le seul porteur d'une notion qu'il appelle « *plectics* », du Grec « *plektos* » (tissé), pour désigner l'étude de la simplicité et de la complexité, un domaine qui aborderait l'étude de la mécanique quantique, de l'information et des systèmes complexes adaptatifs (CAS).
[502] Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar*, *op. cit.*

théories que sur les personnes. Gell-Mann reprochera les livres de vulgarisation précédents pour avoir fourni une image « distordue » du SFI[503].

Entre 1994 et 1999, les textes sur le SFI s'arrêtent, probablement comme effet des critiques que l'institut avait reçu pour son autopromotion excessive[504]. Le seul livre qui sort pendant ce laps de temps est *Hidden order* de John Holland[505] : c'est un livre à la fois théorique et personnel. À la fin des années 1990, le SFI et la complexité retournent en vogue et on assiste à une nouvelle vague de publications, désormais moins uniquement focalisés sur la nébuleuse SFI : *Harnessing Complexity* de Robert Axelrod et Michael Cohen[506] (livre adressé au manageurs), *Fragile Dominion* de Simon Levin[507] (livre sur la perte de la biodiversité), *Emergence* de Steven Johnson[508] (livre focalisé sur les fourmis et la conscience), *Deep Simplicity* de John Gribbin[509] (livre plutôt focalisé sur la physique), *Simply Complexity* de Neil Johnson[510], *The Perfect Swarm* de Len Fisher[511], *Adventures in Complexity* de Lesley Kuhn[512], *Complexity : A Very Short Introduction* de John Holland[513], sont – parmi d'autres[514] – des textes de vulgarisation scientifique qui portent sur les recherches du SFI ou proches de lui. Ces textes ne retracent que marginalement quelques aspects de la vie de l'institut. Certainement ce qu'ils contribuent à créer, c'est l'image d'un centre de recherche ambitieux et innovant du point de vue de la manière de faire science. L'interdisciplinarité, la liberté de rencontre et de collaboration, aussi bien que la prise de risque seraient, dans le récit de ces ouvrages, les préconditions pour poser des questions fondamentales, sur l'origine de la vie ou sur le futur du marché boursier. Cette recherche fondamentale est revendiquée comme théorique, mais vendue comme étant un moyen certain de donner à la société des outils pour résoudre ses problèmes majeurs. Tout cela se base sur une autre revendication, d'ordre épistémologique : l'abandon de la science ainsi dite newtonienne, laplacienne et linéaire, en faveur d'une science antiréductionniste, interdisciplinaire et non-linéaire.

L'article *More is different* du physicien de Princeton, expert de la matière condensée et des verres de spin, Philip Anderson jette en 1972 un certain nombre d'idées qui seront

---

[503] *Ibid.*, p. XIV.

[504] Horgan, J., « From complexity to perplexity », *Scientific American*, 1995, vol. 272, n. 6, pp. 74-79.

[505] Holland, J.H., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, Cambridge (USA), Perseus Books, 1996.

[506] Axelrod, R. & Cohen, M.D., *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*, New York, The Free Press, 1999.

[507] Levin, S., *Fragile Dominion. Complexity and the Commons*, Reading, Perseus Books, 1999.

[508] Johnson, S., *Emergence. The connected lives of ants, brains, cities and software*, Londres, Allen Lane, The Penguin Press, 2001.

[509] Gribbin, J., *Deep Simplicity. Chaos, Complexity and the Emergence of Life*, Londres, Allen Lane, The Penguin Press, 2004.

[510] Johnson, N., *Simply Complexity. A Clear Guide to Complexity Theory*, Londres, Oneworld Publications, 2009 (première edition 2007, sous le titre *Two's Company, Three is Complexity*).

[511] Fisher, L., *The Perfect Swarm. The Science of Complexity in Everyday Life*, New York, Basic Books, 2009.

[512] Kuhn, L., *Adventures in Complexity. For Organisations near the Edge of Chaos*, Dorset, Triarchy Press, 2009.

[513] Holland, J., *Complexity : A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2014.

[514] Pour davantage de titres, voir : Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, p. 194 (note en bas de page).

reprises par le SFI dix à quinze ans plus tard[515]. L'idée fondamentale de l'article est d'époque aristotélicienne : « the whole becomes not only more than but very different from the sum of its parts »[516], et que donc le réductionnisme de la physique, ramenant tous les phénomènes à quelques lois simples, n'est pas à même de rendre compte des niveaux supérieurs. Chez Anderson, il est déjà question de complexité : « Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors require research which I think is as fundamental in its nature as any other »[517]. Autrement dit : « At each stage entirely new laws, concepts, and generalizations are necessary »[518]. Et il est déjà question d'interdisciplinarité, car, sans l'appeler ainsi, Anderson utilise une métaphore, celle de jeter des ponts entre les montagnes des différentes sciences.

Si ce texte a eu des retentissements au sein de la communauté scientifique, ce sont les livres de vulgarisation qui ont le plus marqué les esprits, non seulement du grand public, mais aussi des jeunes chercheurs et chercheuses qui ont ensuite adhéré aux SSC, des entrepreneurs qui ont financé le SFI ou se sont inspirés de leurs théories, et même de certains artistes qui ont monté des expositions « interdisciplinaires » avec des scientifiques. La publication la plus efficace dans la création du halo féerique du SFI reste celle qui a été écrite par la personne la plus externe à l'institut : Mitchell Waldrop.

Jeune docteur en physique au chômage à l'époque de la guerre du Vietnam, Waldrop décide de se reconvertir dans le journalisme. Il travaillait chez *Science*, lorsqu'il signe un contrat éditorial avec *Simon & Schuster*[519] pour écrire un livre sur le SFI. Se basant sur un séjour de deux semaines, sur de nombreux entretiens téléphoniques et sur quelques archives, il décide de construire son livre de manière romanesque autour de la personne de Brian Arthur :

> « I tried to organize the book not by topics, but as a narration. Around the people. I realized that Arthur had met people in sequence. By following him, using him as a narrative thread throughout the book, I could talk about the people he met. In the second part of the book, I let that out and treated ideas »[520].

Waldrop nous a raconté ne pas avoir reçu d'aide financière de l'institut et que son enthousiasme était sincère – ce qui ne l'a pas empêché plus tard de devenir sceptique vis-à-vis du domaine des SSC. Son livre a été vendu assez rapidement à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires, pour un total de plus de 100.000 copies depuis 1992. Il a aussi généré plusieurs vocations dans le domaine. Plusieurs membres du SFI

[515] Anderson, P., « More Is Different », *op. cit.*
[516] *Ibid.*, p. 395.
[517] *Ibid.*, p. 393.
[518] *Ibid.*
[519] Entretien avec Mitchell Waldrop, 02.12.16.
[520] *Ibid.*

nous ont raconté que le texte de Waldrop n'avait pas été bien reçu par tous les membres. Waldrop en est conscient et nous a expliqué que certaines personnalités auraient raconté l'histoire différemment. Toutefois, les archives internes du SFI montrent que le livre était souvent envoyé par la Direction à plusieurs types de destinataires, presque comme matériau publicitaire ou en tout cas en guise d'introduction à l'histoire de l'institut. Conscient du rôle du journaliste et de l'importance de son livre pour la visibilité qu'il donnait à l'institut, la Direction du SFI a su en profiter efficacement. Comme le reconnait Harold Morowitz dans son compte-rendu de *Complexity*, paru sur le bulletin hivernal du SFI de 1992, Waldrop ressemble plus à un reporteur qu'à un historien[521]. Morowitz va même plus loin, en soutenant une thèse qui s'accorde avec la vision de l'histoire indigène que nous défendons : « in these days a journalist is also an actor, for support of research is geared to fame, and fame comes in part from inclusion in books of this type »[522].

À la lumière de nos recherches, le livre de Waldrop confirme que, au commencement, les intentions des fondateurs de l'institut sur le contenu scientifique des activités n'étaient pas claires et consensuelles. Waldrop a raison aussi de souligner l'importance de la terminologie de John Holland pour former la langue officielle de l'institut, mais il exagère lorsqu'il soutient que l'agenda de recherche de Holland devint l'agenda de recherche du SFI[523]. Waldrop, en outre, insiste sur le singulier de la « science de la complexité », alors que ses propres interlocuteurs ne font que disséminer des doutes sur une telle prétendue unité. Pour des raisons théoriques, nous refusons d'ailleurs certaines naturalisations du journaliste, lorsqu'il affirme par exemple que la science de la complexité « était là-dehors en train d'attendre sa naissance »[524]. Les aspects fondamentaux du récit de Waldrop dont nous nous éloignons le plus, en dehors du style captivant et commémoratif, relèvent de deux choix de focale. D'une part, nous récusons le choix des personnalités autour desquelles il a décidé d'axer son histoire : en considérant d'autres scientifiques, mais surtout aussi des membres du staff, du conseil d'administration, du monde des entreprises et des agences fédérales, une toute autre histoire peut être racontée ; d'autre part, il y a un véritable manque de prise de distance vis-à-vis des discours épistémiques et de la communication promettante du SFI. C'est ainsi que le discours de Waldrop devient une caisse de résonance des stratégies, des promesses et des narrations des entrepreneurs scientifiques liés au SFI. Le sien est un choix délibéré, un choix qui lui convint au moment de l'écriture et qu'il ne désavoue pas aujourd'hui.

Une thèse en histoire et philosophie des sciences de Harvard a raconté, en 2012, la trajectoire conjointe de la théorie du chaos et des SSC[525]. Lambert Williams, qui en est

[521] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 7.
[522] *Ibid*.
[523] Waldrop, M.M., *Complexity, op. cit., p. 149.*
[524] *Ibid., p. 17.*
[525] Williams, L., *Modeling, Building, Writing, op. cit.*

l'auteur, a défendu la position selon laquelle la vulgarisation est nécessaire à la fondation d'un domaine : « the popular science genre [is] something *constitutive* of fields, and not just post-facto vehicles for reporting on them »[526]. Pour lui, « les stratégies littéraires […] ont aidé à *fabriquer* la science du chaos et de la complexité »[527]. En analysant de près seulement quatre livres de vulgarisation sur ces deux domaines, Williams montre comment leurs auteurs ont contribué à créer une image publique de la théorie du chaos et des sciences de la complexité. Une des stratégies a été de donner beaucoup d'espace aux descriptions des chercheurs choisis comme protagonistes. Ils sont souvent présentés comme des génies incompris, aussi marginaux qu'inventifs, exotiques et fascinants : ils sont des rebelles, des gens dynamiques, des explorateurs, cela dans le but de créer un contraste avec les scientifiques réactionnaires mono-disciplinaires. Le style d'écriture est souvent lui-même « non-linéaire » ou « adaptatif », comme pour restituer le contenu aussi à travers la forme. Ce sont les personnalités présentées qui servent le besoin d'unification de ce désordre créatif. Ces personnalités sont souvent présentées par leur surnom, afin de transmettre une proximité entre l'auteur et les scientifiques, qui dégagent une sympathie et un phénomène d'identification dans le lecteur. En outre, dans quelques cas, la fascination pour la complexité est amplifiée par un penchant pour le mysticisme, qui peut prendre des allures plus bouddhistes ou plus catholiques selon les cas. Williams mentionne aussi l'importance de l'*essentialisme géographique*, lorsque certains auteurs ont souligné la correspondance entre Santa Fe, comme lieu-carrefour entre plusieurs cultures différentes (indiens d'Amérique, catholiques, hippies, scientifiques, artistes, etc.), et le SFI, carrefour interdisciplinaire.

Le rôle des articles de journaux, des passages à la télévision ou à la radio, ainsi que des livres de vulgarisation sur le SFI, est considéré comme capital. Les conseils scientifique et administratif de l'institut sont conscients de l'effet en cascade que les médias produisent sur les financements, sur l'enrôlement de nouveaux adeptes (jeunes et moins jeunes) et sur la crédibilité de l'institut. En témoignent les références fréquentes à ce genre de publications dans le bulletin, aussi bien que le fait que nous avons trouvé plusieurs boîtes d'archives dont une grosse partie est formée de matériau médiatique concernant le SFI. Qui plus est, la publicité médiatique est parfois vue comme un résultat en soi.

La première couverture médiatique nationale du SFI a lieu dans en août 1986 dans le journal *Business Week*[528]. La première fois que l'on parle d'un « effet SFI », c'est dans un éditorial de George Cowan, en ouverture du bulletin estival de 1990, lorsqu'il se réfère à une interview avec John Reed, parue dans le magazine *Manhattan, Inc.*[529]. Interrogé sur les succès les plus importants des premières années du SFI, Edward

[526] *Ibid.*, p. 52.
[527] *Ibid.*, p. 188.
[528] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 16.
[529] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 2.

Knapp cite un article de Brian Arthur paru dans le *Scientific American* à propos du projet de recherche rassemblant les économistes et les physiciens[530]. À partir de 1990, des mentions de retentissements médiatiques concernant le SFI seront faites régulièrement dans les bulletins. Un article du 8 mai 1990, paru dans le *Wall Street Journal*, saluait l'engagement de l'institut dans une recherche qui pouvait potentiellement amener à des profits pour les investisseurs. Il se félicitait en outre de l'esprit entrepreneurial du SFI et citait l'intérêt manifesté de la part du monde de la finance vis-à-vis de l'institut[531]. En parlant de la légitimité que, vingt ans après sa fondation, le SFI aurait gagnée aux yeux de la communauté scientifique, Geoffrey West, venant d'être élu président en 2006, déclare en 2007 l'importance du lobbying médiatique et mentionne l'effort explicite du SFI pour le poursuivre :

> « This recognition goes well beyond the narrow confines of the traditional scientific community reaching into the corporate and business world. Recently, senior journalists from both *Wired* and *Time* magazines spent time with us prodding and poking around trying to uncover the secrets of our success. Their efforts will result in what we hope to be favorable feature articles (as well as a book) about the Institute. In addition, *Harvard Business Review* will feature an interview with me exploring why SFI is so attractive to businesses »[532].

Avec un intérêt prononcé pour le monde du *business*, West énumère aussi les efforts éditoriaux de certains membres du SFI ayant publié des *bestsellers* :

> « The Santa Fe Institute has been very much in the news this year. The latest is a recent feature article in *Fortune* magazine highlighting SFI Board of Trustees Chairman Bill Miller in which he generously credits the Institute for some of his most important business insights. […] our research and, in particular, our leadership in transdisciplinary science, is featured in many recent books, several by SFI authors. Notable among these are Michael Mauboussin's *More Than You Know* and Eric Beinhocker's *The Origin of Wealth*, both named by *strategy + business Magazine* as two of the three 'Best Business Books : Economics' in 2006, while *More than you Know* was also named by *Business Week* as one of the 'Best Business Books of 2006' »[533].

Une section du bulletin 2011 est dédiée aux informations concernant l'institut. Deux encadrés sont dédiés à la couverture médiatique donnée à certains des travaux de ses

[530] *Ibid.*, p. 10.
[531] *Ibid.*, p. 21.
[532] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, p. 2.
[533] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 0.

membres[534]. Dans les numéros de l'*Annual Report* allant de 2007 à 2014, une section régulière est appelée « Impact : Selected Publications in the Popular Media ». Elle contient plusieurs pages listant des articles, entretiens télévisés ou radio, et des livres sur le SFI**[535].** Aucune manifestation d'estime n'est dédaignée, même lorsqu'elle provient d'un magazine *pop* comme *Rolling Stone* :

> « The outcomes range from the tangible to the intangible, and often lead to the unexpected – who would have guessed that one of the world's premier scientific research institutes would be featured in *Rolling Stone* magazine's '2007 Year in Review' ? »[536].

Un autre type de médium investi par le SFI est le domaine de l'art : « SFI Research Professor Jim Crutchfield has been one of the principal scientific advisors to a current exhibit ». Le titre de l'expo, qui s'est tenue à l'*Exploratorium* de San Francisco en 1996, était « Turbulent Landscapes : The Natural Forces that Shape Our World »[537]**.** Composée de plus de trente œuvres, elle visait à montrer les systèmes complexes naturels à travers la manipulation des éléments, tels que l'eau et l'air. Le SFI ne sera pas le seul à se lancer dans ce genre d'activités : l'ISC-PIF a récemment participé à une exposition du même genre au Palais de Tokyo de Paris**[538]**.
En conclusion, nous souscrivons l'affirmation de Williams selon laquelle le journalisme scientifique et l'*outreach* médiatique de l'institut a fortement aidé les SSC à se constituer comme une entité socio-épistémique reconnue par plusieurs groupes sociaux (académie, grand-public, décideurs, firmes), nous élargissons le champ des éléments que nous mettons en cause pour une telle construction. Au tout début de la fondation du SFI, le prestige des fondateurs fut fondamental.

Le prestige des fondateurs

Dans cette section, nous aborderons plusieurs questions fondamentales, dont les stratégies de légitimation et de recrutement du personnel scientifique de la part des fondateurs du SFI, la décision de fonder une « science de la complexité », la manière dont cette nouvelle science est devenue uniquement computationnelle et enfin le rôle du capital social et symbolique des fondateurs dans la fondation de l'institut. Pour cette raison, il s'agit de la sous-section la plus longue, que nous avons décidé de diviser en sous-sections afin d'en faciliter la lecture.

---

[534] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2011, Vol. 25, pp. 14-15.
[535] Par exemple, SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, pp. 28-31.
[536] *Ibid.*, p. 5.
[537] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 21.
[538] Page de l'œuvre Stalagmèmes exposée au Palais de Tokyo dans l'exposition « Le Rêve des Formes » qui s'est tenue du 12 juin au 12 septembre 2017 : https://iscpif.fr/stalagmemes/loeuvre/.

Qui sont les protagonistes du début de l'histoire du SFI

La première question qui se pose, lorsqu'une nouvelle institution, voire un nouveau domaine apparaît, concerne les raisons qui ont amené leurs instigateurs à s'engager dans une telle entreprise. Pourquoi des scientifiques établis décident de dépasser leur domaine, alors qu'ils y jouissent d'une position solide, afin de se lancer dans un champ différent ? Qu'est-ce qu'ils cherchent, qu'est-ce qu'ils espèrent obtenir, d'un point de vue intellectuel, social, institutionnel et financier, qu'ils ne pouvaient pas obtenir dans leur position de départ ? Pour répondre à cette question, il faut distinguer au moins deux types de scientifiques qui s'embarquent dans une telle aventure. Une première catégorie est celle des chercheurs et des chercheuses (et dans le cas du SFI, elle inclut aussi des entrepreneurs), qui possèdent un capital social, symbolique et institutionnel suffisamment grand pour que leur rapprochement du SFI se fasse sur la base d'intérêts autres que celui de l'auto-affirmation dans le champ académique. La deuxième catégorie est celle des scientifiques qui se trouvent dans une position de faiblesse, liée à leur jeune âge ou à leur marginalité académique, qui trouvent dans le SFI, et plus en général dans les SSC, à la fois une maison qui les accueille et un aiguillon par lequel espérer conquérir de la crédibilité, du capital social et symbolique dans le propre champ scientifique. Cette section montre deux choses : la construction de toutes pièces de la problématique des systèmes complexes et le fait qu'une telle entreprise n'aurait pas pu marcher sans le capital social, symbolique et économique des fondateurs du SFI.

La liste des fondateurs est donnée par l'un d'entre eux, Edward Knapp, dans l'éditorial du bulletin de l'hiver 1994 :

> « Our founding group included the late Herbert Anderson, Peter Carruthers, George Cowan, Stirling Colgate, Darragh Nagle, Nicholas Metropolis, Louis Rosen, and myself, all Senior Fellows at Los Alamos National Laboratory. The discussion quickly left the boundaries of the lab. Joining in were mathematician Gian-Carlo Rota from M.I.T., David Pines from the University of Illinois, and chemist Anthony Turkevich from University of Chicago. Murray Gell-Mann heard about the nascent organization and immediately took an active role in its formation. Richard Slansky, who was a LANL Fellow at the time, joined the group as did John Rubel, a former deputy director for research in the Department of Defense, who provided much practical advice. Alwyn C. Scott, head of the *Center for Nonlinear Studies* at Los Alamos and later his successor, David Campbell, made contributions to research planning. […] Mike Simmons, who had spent many years in the management of science at LANL, joined SFI as Vice President in 1986 »[539].

[539] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 0.

Le groupe s'est réuni une fois par semaine pendant deux ans. Lors de ces réunions, ses membres discutèrent une série d'aspects fondamentaux pour la mise en place de l'institut : « on what would be the best scientific focus for the institute, what should be the scale, what was the right mix of students and faculty, how best to broaden the initial group of founders, and the like »[540]. En mai 1984, puisque le nom de Santa Fe Institute était déjà pris par un service thérapeutique, le Rio Grande Institute est fondé[541], mais il ne possède pas de siège physique ni de staff, comme le reporte Knapp plus tard : « We joke that our early home was a desk drawer in Trustee Art Spiegel's[542] office in Albuquerque, and we progressed to a Santa Fe post office box before we had a place of substance »[543]. En octobre de la même année l'institut reçoit la désignation de « non-profit » par l'*Internal Revenu Service*[544]. Peu de temps après, le centre thérapeutique fit faillite en libérant le nom, ainsi l'institut modifia le statut en novembre 1985 et prit le nom qu'il a conservé jusqu'à aujourd'hui. Dans un premier temps, le SFI loua un bureau dans un édifice dans la ville de Santa Fe pour y installer ses deux seuls employés : Ginger Richardson, secrétaire polyvalente, et Ron Zee, directeur du développement[545]. Il s'installe ensuite au 1120 Canyon Road, dans le Couvent de Cristo Rey, en février 1987[546]. En juillet 1991 il s'installera au 1660 Old Pecos Trail, de manière temporaire[547]. Et il finira par s'installer dans son lieu définitif, au 1399 Hyde Park Road, en juillet 1994[548].

Dans la phase de construction de l'institut, un nombre restreint de figures est très actif. Si Gell-Mann, Anderson et Pines étaient engagés plutôt dans la production du discours scientifique, Cowan était impliqué aussi bien dans des discours scientifiques que dans des opérations pratiques de collecte de fonds et de mise en place du centre[549]. En 1986, les scientifiques associés à l'institut passent de huit à dix-sept. Cowan est assisté par trois vice-présidents, Peter Carruthers, John Rubel et Mike Simmons, par le président du conseil d'administration David Pines et par le vice-président Robert McCormick Adams, ainsi que par le secrétaire Nicholas Metropolis et le trésorier Arthur Spiegel[550]. « Art Spiegel, a businessman and founding member, was, comme l'explique Knapp, very important in getting the Institute off the ground »[551]. Dans les archives nous avons

[540] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 21.
[541] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 16.
[542] Art Spiegel est un entrepreneur ami de George Cowan, qui a eu un rôle important dans les premières collectes de fonds pour démarrer l'institut : Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, pp. 72-73.
[543] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 0.
[544] https://www.irs.gov/charities-non-profits.
[545] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[546] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 16.
[547] *Ibid.*, p. 17.
[548] *Ibid.*
[549] « Cowan is often credited by his colleagues as the stimulus behind the Santa Fe Institute. He was the person who brought the original Los Alamos lunch group together » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 3.
[550] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, p. 14 ; SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 8.
[551] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 9.

retrouvé les dizaines de lettres que Spiegel envoya à ses contacts chez les notables de Santa Fe – entrepreneurs et manageurs de tous les domaines, scientifiques, commerçants – pour les inviter à la présentation de l'institut, dans l'espoir qu'ils le financent par la suite[552]. L'importance du capital social et symbolique de ces personnes est visible dans ce que Cowan explique à propos de Spiegel, qu'il avait connu à une fête privée d'un ami en commun :

> « I was encouraged [dans le fait de faire démarrer la première activité de l'institut, un workshop] by enthusiastic support from my old friend Arthur Spiegel, son of the founder of the Spiegel Catalogue Company. Art had left Chicago as a young man and moved to Albuquerque to become an investment manager for a number of institutions and southwestern Indian tribes. He gave us the use of his office staff and telephone and attracted initial donations from a number of local corporations. He used his contacts in Chicago to obtain an appointment with a principal in the administration of the MacArthur Foundation. The Foundation pledged twenty-five thousand dollars »[553].

Quant à Ginger Richardson, elle est embauchée par Cowan en 1986 pour organiser les événements scientifiques et écrire les projets pour financer les workshops[554]. En 1988, elle prend la position de directrice des workshops et des relations publiques, ainsi que celle de superviseuse des écoles d'été et d'hiver[555]. Pendant la plupart de sa carrière à l'institut, Richardson s'est occupée de l'écriture des projets pour demander les financements ; ce n'est que dans les cinq dernières années qu'elle est devenue uniquement responsable de la partie éducative[556].

Encadré 5. Les financements

Le budget de la première année 1984-1985 s'atteste autour de 100.000 dollars, grâce surtout à la collecte de fonds menée par Arthur Spiegel auprès de riches investisseurs locaux et par certains des *Senior Fellows* auprès des fondations[557]. En 1986 le budget double, pour attendre quota 571.000 dollars, en 1987. Ce n'est qu'en 1988 que le SFI dépasse le seuil symbolique du million de dollars[558]. En 1992 le nombre de financements provenant des universités, des entreprises, des fondations, des agences gouvernementales et des donateurs privés augmente sensiblement[559], pour arriver à 3.900.000 en 1994[560].

En 1987, les premiers financements substantiels proviennent surtout des fondations privées (Russell Sage Foundation, Alfred Sloan Foundation, Richard Lounsbery Foundation et Heinz Company Foundation) et des organismes fédéraux (Department of Energy et National Institutes of Health). La seule entreprise qui finance le

[552] SFI, Lettres d'Arthur Spiegel, boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
[553] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 143.
[554] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[555] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 20.
[556] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[557] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 8-9.
[558] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 22.
[559] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, pp. 46-47.
[560] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, pp. 16-17.

centre à cette époque est la Citicorp à travers John Reed. Cette année-là, des donateurs privés s'ajoutent à la liste[561]. L'ouverture graduelle au monde des entreprises se fait, d'abord, avec l'entrée de nouveaux membres dans le conseil d'administration. Dès le début de 1988, des représentants du monde du pétrole et des armes s'ajoutent au conseil (Robert Anderson de la Hondo Oil and Gas Company et Venkatesh Narayanamurti des Laboratoires Sandia, gérés par l'Etat fédéral et la compagnie privée d'armes non-nucléaires Lockheed)[562]. Les recrutements se font souvent par des amitiés et des contacts qui précèdent la création de l'institut, comme c'est le cas avec Robert Anderson, ami de longue date de Cowan[563]. À partir de la deuxième moitié de 1988, la National Science Foundation s'ajoute à la liste des organismes publics qui financent le SFI, tandis que la John and Catherine MacArthur Foundation s'ajoute à celle des fondations privées[564]. En 1989 se joignent d'autres financeurs : les universités de l'Arizona, de l'Illinois et du Texas, ainsi que des fondations (Esther and Joseph Klingenstein, Richard Lounsbery, The Needmor Fund, Seth Sprague) et des entreprises (Barclay's, Trinity Capital Corporation)[565]. En 1990, les fondations qui financent sont en nombre de neuf et les compagnies en nombre de douze, avec des sorties et des nouvelles acquisitions, telles que IBM, Morgan Stanley[566] ou Volvo[567]. Le conseil d'administration, cette même année, s'enrichit de représentants du monde financier, informatique et aéronautique[568]. L'industrie numérique et la finance resteront les deux domaines principaux de provenance des membres du conseil d'administration pendant plusieurs années[569]. À partir de la fin des années 1990, les donations privées constitueront les deux tiers des finances de l'institut.

Dans un entretien publié dans le quatrième bulletin publié par le SFI, Cowan explique les raisons de son engagement dans la mise en place de cet institut. Il n'était pas seulement un chimiste du LANL, il faisait partie des quelques dizaines de personnes ayant travaillé à la construction de la bombe atomique dans le *Manhattan Project*[570]. Dans le passage que nous allons citer, il se réfère précisément à sa carrière de scientifique appliqué pour motiver le besoin de fonder une nouvelle institution. S'il lui est arrivé souvent de travailler avec des équipes pluridisciplinaires ou d'en diriger, afin de résoudre des problèmes complexes, il dit s'être toujours demandé comment faire pour que cela réussisse au mieux :

> « The only way I was ever able to do it was to get two good people in a room, people representative of different parts of the problem, and let them discuss it. If they agreed that it was a good and necessary interdisciplinary program, and if they more or less liked each other, then you brokered a marriage »[571].

Cet extrait, qui confirme l'ancrage historique de l'interdisciplinarité dans le contexte de la Deuxième Guerre mondiale[572], représente aussi l'une des premières

[561] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 15.
[562] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 8.
[563] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 10.
[564] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 2.
[565] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 31.
[566] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 27.
[567] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 26.
[568] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, pp. 6-7.
[569] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 4.
[570] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*
[571] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.
[572] Johnson, S.B., « Three Approaches to Big Technology », *op. cit.*

manifestations de l'intérêt du SFI pour ce que nous appellerons, dans le chapitre 10, l'*ingénierie de l'interdisciplinarité*, à savoir l'ensemble des techniques sociales, architecturales et organisationnelles qui sont censées produire la collaboration entre chercheurs de cultures différentes. Ce qui est certain, c'est que la mise en place de l'interdisciplinarité constitue l'un des objectifs principaux des fondateurs, comme le montrent les discours et les faits : ils veulent bien récréer une sorte de Projet Manhattan, avec son interdisciplinarité et avec ses simulations Monte Carlo[573]. Au sein du SFI, ses fondateurs intervertissent l'ordre logique dans la relation entre l'interdisciplinarité et les problèmes à résoudre. Si pendant la guerre, face à un problème, on a convoqué plusieurs disciplines pour le résoudre, les fondateurs du SFI mettent en place l'interdisciplinarité avant même d'avoir des problèmes concrets à résoudre.

Cowan relate ensuite que son impression, selon laquelle la recherche américaine était trop fragmentée, lui fût confirmée pendant son service dans le White House Science Council sous la présidence de Ronald Reagan[574]. Il jugea que les décisions sur les sciences et les technologies étaient prises pour des raisons politiques, et non pas sur des bases scientifiques. Ainsi, il proposa aux décideurs politiques de Washington de mettre en place un département de sciences et de technologies qui prenne des décisions stratégiques nationales, à l'aide d'experts pluridisciplinaires. On lui répondit ce qui forma l'étincelle pour concevoir le SFI : « People [at the White House] generally felt that such a department wouldn't be headed by a scientist because they [sic] aren't trained broadly enough and don't know their way through the jungle [of politics] »[575]. En ayant trouvé la porte du gouvernement fermée, Cowan témoigne de sa réaction proactive : « So that got me thinking about something like the Santa Fe Institute, how an institute might persuade some people to become generalists, to train people to range more broadly across the disciplines »[576]. L'idéal de chercheur que Cowan avait en tête était une sorte d'« homme de la Renaissance du XXI^{ème} siècle », capable d'avoir à faire avec « le monde réel désordonné [*messy*], qui n'est pas élégant et qui n'est pas réellement pris en compte par la science »[577].

Les SSC arrivent après la fondation du SFI

Par la suite, les discussions des *Senior Fellows* portèrent sur plusieurs sujets, dont l'intelligence artificielle, les sciences cognitives et les réseaux de neurones. Assez tôt le groupe commença à parler de « synthèses émergentes » pour nommer les nouvelles expériences interdisciplinaires qui avaient apparu à cette époque. Ici, une question se pose : si les discours des fondateurs s'axent pour la plupart sur l'interdisciplinarité, pourquoi le SFI est-il connu pour les SSC ? Comme l'explique Gell-Mann dans le

[573] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 124.
[574] *Ibid.*, p. 123.
[575] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.
[576] *Ibid.*
[577] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.

bulletin de l'hiver 1994, l'idée d'une science de la complexité n'était pas présente dès le début : « In the beginning, we couldn't see clearly what sorts of emerging scientific syntheses we should seek »[578]. La biologie moléculaire, issue d'une fusion entre la biologie et la physique, était considérée comme l'*épitomé* du succès interdisciplinaire qu'ils auraient bien aimé reproduire en mobilisant d'autres problématiques et d'autres disciplines. L'idée fit son chemin, parmi les fondateurs du SFI, que d'autres développements semblables pouvaient se faire. Dans un entretien un peu plus tardif, Knapp revient sur ces rencontres et sur l'objectif de dépasser et pousser davantage les efforts interdisciplinaires du LANL :

> « We became enthusiastic about the possibility of establishing an interdisciplinary institute in Santa Fe. At that point we hadn't homed in on the sciences of complexity and nonlinear systems. We knew that Los Alamos was very good at bringing areas of different disciplines of science to bear on a problem. But we felt that the breadth of problems that could use this interdisciplinary approach was much broader than the Laboratory could attack »[579].

Comme l'atteste ce témoignage, le thème de la complexité n'était nullement *la* cause des rencontres des *Senior Fellows*, même si Pines compare le processus de gestation de l'institut à celui de l'évolution des systèmes complexes réels : « This process of defining the Institute was really an evolutionary, adaptive process, of just the kind we encounter in the complex systems which are the focus of much of our work »[580]. Ce type de naturalisations de processus sociaux et politiques, par le biais des théories promues par le SFI lui-même, sera courant tout au long de l'histoire des SSC. Toutefois, d'un point de vue historique il faut bien souligner que la recherche du thème fut une décision descendante, stratégique, comme le rappelle Cowan : « And we began to define our theme as complexity »[581]. Lors d'une des rencontres fondatrices, Gian Carlo Rota avait par exemple remarqué : « I think we should focus on a central idea, a banner, a main concept. It cannot be the concept of interdisciplinary work as such »[582]. Si l'objectif socio-épistémique des fondateurs était, comme le dit Knapp, celui de pousser « les frontières de l'étude interdisciplinaire beaucoup plus loin, dans le sens de ne pas limiter les domaines qui vont être impliqués dans un problème particulier »[583], le terme de complexité ne leur apparût comme le nom le plus efficace pour identifier un tel projet que quelque temps plus tard :

---

[578] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 25.
[579] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 8.
[580] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 21.
[581] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.
[582] SFI, « Concluding Comments, October Workshop », boîte d'archives « SFI Board Meetings September 9, 1984-March 9, 1986 ».
[583] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 9.

> « In fact, as the Institute has grown and matured, it's homed in on the whole idea of complexity. 'Complexity' is kind of a buzz word, perhaps, but we think of a complex system as a system that is probably never in equilibrium, a system with many interacting parts that are not easily described by simple arithmetic »[584].

Metropolis « avait initialement proposé la science cognitive comme le thème central [du SFI] »[585]. Cowan reporte que « [c]hacun avait une version différente de ce qu'il voulait, mais tous étaient prêts à partir »[586] : le futur était ouvert mais la complexité résulte, aux yeux des fondateurs, comme la « grande canopée » sous laquelle agréger les ressemblances entre les différents sujets proposés[587]. La genèse éminemment *discursive* de la « science de la complexité » – au sens où le nom est venu avant la théorie et les données – la distingue d'autres savoirs scientifiques, où des pratiques et des résultats, des techniques et des théories se construisent avant et en même temps que le discours identitaire.

Le projet d'une science de la complexité ne resta pas tel quel pendant toute l'histoire du SFI. Le premier article des bulletins qui prend du recul vis-à-vis de ce projet est de John Casti et date de 1992[588]. Le mathématicien se demande si « complexité » n'est qu'un mot à la mode, suffisamment flou pour passionner des publics différents mais trop flou pour être scientifiquement sérieux. Casti défend l'idée que l'on puisse en faire une nouvelle science, à savoir une section d'une plus « théorie des modèles », à condition de transformer le flou des intuitions et des métaphores initiales dans un langage mathématique précis. Il y a deux raisons données par Casti pour fonder une science de la complexité : la première est la nécessité de parvenir à un cadre théorique pour cartographier les processus dits complexes, la deuxième est la nécessité de dépasser le réductionnisme, défini comme une approche qui sépare les phénomènes en parties et en morceaux.

Le projet d'une science de la complexité s'essouffle ensuite avec l'arrivée en 1996 d'Ellen Goldberg à la présidence et d'Erica Jen à la vice-présidence des affaires académiques[589]. L'extrait suivant, contenu dans un encadré du bulletin de l'automne 2004 dédié aux vingt ans du SFI, relativise même l'idée fondatrice du SFI :

> « In the upheaval, écrit Goldberg, that accompanies the arrival of a grand new idea, there is surely excitement – a buzz surrounding the feeling that with a new way of seeing, anything is possible. It is an excitement that can only surround an idea that

[584] *Ibid.*
[585] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1, p. 26.
[586] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 4-5.
[587] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 144.
[588] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, pp. 10-13.
[589] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 20.

is at its start, all light and potential, without any of the weight of counter-example and experimental failure »[590].

Les deux chercheuses remettent l'accent sur l'interdisciplinarité[591], mais c'est une interdisciplinarité très encadrée. Les nouvelles recherches doivent se faire aux bénéfices des disciplines d'appartenance de ceux et celles qui sont impliqués dans le travail interdisciplinaire[592]. Une fois finie la phase de transition que Goldberg et Jen ont dû traiter comme des administrateurs judiciaires, la rhétorique sur l'interdisciplinarité et les SSC auront de nouveau le vent en poupe avec la présidence d'Eisenstein, puis celle de West et de Sabloff, et enfin celle de Krakauer.
L'interdisciplinarité n'est pas seulement vue, par les fondateurs, comme un moyen de répondre aux nouveaux défis scientifiques et sociétaux : elle est aussi en phase avec l'auto-mythologie des *Senior Fellows*. Un des traits communs à la plupart d'entre eux, c'est en effet de vanter une fière érudition et une multiplicité d'intérêts. Une des raisons qu'ils font passer, pour expliquer leur engagement dans le SFI, serait donc leur insatiable curiosité. Dans un entretien de 1989, Gell-Mann énumère ses passions :

« My interests extend to many other subjects [besides superstring theory] […] including natural history (especially bird study), historical linguistics, archeology, history, depth psychology, and creative thinking. All these subjects are connected with biological evolution, cultural evolution, and learning and thinking – examples of adaptive complex systems. I am also concerned about policy matters related to world environmental quality […] restraint in population growth, sustainable economic development, and stability of the world political system […] »[593].

Dans ses mémoires, Cowan nombre ses intérêts : chimie, sciences cognitives et problèmes géopolitiques[594]. Colgate s'intéressait aux questions pédagogiques et à l'épidémiologie, Knapp s'intéressait aux politiques scientifiques pouvant encourager l'interdisciplinarité, Pines pour la même raison avait fondé le Center for Advanced Study à l'Université d'Illinois, tandis que Slansky avait travaillé à cheval entre plusieurs disciplines et voulait prolonger l'expérience[595]. Brian Arthur est un économiste qui a trouvé sa source d'inspiration dans la physique de Prigogine, tandis que Holland se voit à la fois comme un informaticien, un psychologue et un biologiste. Le romantisme entretenu par les fondateurs et les premiers membres du SFI autour du fantasme de l'Homme de la Renaissance ne doit toutefois pas cacher le projet qui se trouve derrière ce désir de rapprochement entre savoirs et que nous avons déjà abordé

[590] *Ibid.*, p. 4.
[591] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 4.
[592] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. E.
[593] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 11.
[594] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 23.
[595] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 6-8.

dans le chapitre précédent. Cowan ne ménage pas ses mots sur l'opinion que ses collègues ont des sciences sociales : « Physical scientists think the social sciences are inelegant »[596]. En se souvenant d'une rencontre tenue à l'Aspen Institute quelques années auparavant, où il était le seul scientifique assis à une table avec des humanistes, Cowan reporte avoir eu la réflexion suivante : « This would be an even greater idea if the discussion were driven by facts rather than essays »[597].

Comment les SSC sont devenues des sciences computationnelles

C'était clair pour Cowan, comme pour d'autres, que l'ordinateur devait se trouver au centre des activités de recherche de cette nouvelle figure de scientifique généraliste. En discutant de ces sujets avec les *Senior Fellows* du LANL, il aborda la question de la « science computationnelle » : « a big umbrella that covers all of these subjects – algorithms that somehow simulate what these systems do »[598]. Nagle relate qu'à la question, « Quelle nouvelle initiative pourrions-nous, en tant que *Senior Fellows*, prendre pour fonder une nouvelle science », plusieurs personnes avaient répondu en mentionnant les supercalculateurs : « because at that time parallel computers were a hot idea »[599]. Aussi l'un des fondateurs de l'ère computationnelle comme Metropolis impulsa pour aller dans cette direction ; un bulletin en rappelle la biographie, de grand intérêt pour l'histoire de l'informatique et de la simulation numérique en sciences :

> « During World War II, Metropolis and Richard Feynman struggled with the extremely slow electromechanical machines used for the hand calculations needed for weapons design. This experience caused Metropolis to become deeply intrigued by John von Neumann's suggestion that ENIAC, the first electronic calculator, could have a major impact on the future of computation. Metropolis went on to become the builder of a series of Maniac computers at Los Alamos National Laboratory, an accomplishment that established him as one of the founders of the information age. The Monte Carlo method of calculation emerged during this era through the interactive efforts of Metropolis, Ulam, and von Neumann »[600].

Les fondateurs du SFI avaient expérimenté la puissance montante de l'ordinateur dans leurs recherches nucléaires, notamment dans les simulations Monte Carlo, et ils voulaient en étendre l'application à d'autres domaines. Les premiers professeurs et postdoctorants affiliés à l'institut, issus surtout de l'informatique, donneront vie à des programmes de recherche basés sur le développement de plateformes numériques – les MBA, les automates cellulaires, les algorithmes génétiques. Ceux-ci représenteront, pour les temps à venir, les principaux éléments identificateurs du SFI : « Without

[596] *Ibid.*, p. 3.
[597] *Ibid.*
[598] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.
[599] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 30.
[600] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1, p. 26.

computer, nous a dit Daniel Stein, you wouldn't have had complex systems sciences »[601]. L'attention de l'institut pour le numérique, d'ailleurs, se manifestera par plusieurs facteurs. Déjà en 1988, le SFI dota d'un ordinateur Macintosh chaque membre du staff, ainsi que plusieurs IBM et Sun pour les chercheurs et les chercheuses associés ; d'une connexion à la New Mexico Technet pour être en contact avec le LANL et avec quatre universités de l'État ; ainsi que d'une connexion à ARPANET pour bénéficier de plusieurs supercalculateurs distribués sur le territoire national[602]. L'institut lance son site www.santafe.edu en 1995[603], et en 2001 il construit l'un des premiers exemples de *cluster* d'ordinateurs *in situ*, qui change de configuration régulièrement[604]. L'aspect mathématique et computationnel des recherches du SFI était un élément visé dès le début par les fondateurs. Dans le statut de fondation de l'institut, toutefois, l'on ne refusait pas la possibilité qu'il y ait des laboratoires de sciences physiques et biologiques. C'était un des objectifs envisagés :

> « The primary charitable, educational and scientific purposes for which the corporation is formed are : a) To engage in, carry on and conduct scientific research, experiments, investigations, analyses and studies in the physical and social sciences ; and b) To instruct students in the sciences and to confer academic degrees to candidates […] and c) To establish, maintain and operate laboratories, plants and any and all other establishments for the purposes aforesaid »[605].

Gell-Mann l'avait affirmé clairement lors d'une des rencontres fondatrices : « Although the Institute will have, especially initially, an important emphasis on theory, there will be experimental and observational work »[606]. Pourtant le SFI se présente et est connu comme un centre éminemment théorique et computationnel. Les SSC elles-mêmes ont cette renommée : elles sont définies comme des sciences principalement ancrées sur l'usage de l'ordinateur. Mais c'est le SFI qui a donné cette direction au domaine. Pourquoi alors a-t-il changé d'avis à propos de la nécessité d'avoir des laboratoires expérimentaux ? Les archives montrent que la direction prise par les SSC a été infléchie par une contingence géographique et politique.
Un rapport interne du SFI admet que l'acquisition de la *Hurley Residence*, qui porte maintenant le nom de *Cowan Campus*, a été controversé tant à l'intérieur du SFI qu'en

[601] Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
[602] SFI, « Report of the Computational Resources Committee to the Annual Meeting of the Science Board of the Santa Fe Institute. March 11, 1988 », boîte d'archives « SFI Board Meetings 1988 ».
[603] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 22.
[604] Entretien avec Nathan Metheny, 27.09.16.
[605] SFI, « Articles of Incorporation of Rio Grande Institute. May 22, 1984 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[606] SFI, « Concluding Comments, October Workshop », boîte d'archives « SFI Board Meetings September 9, 1984-March 9, 1986 ».

dehors[607]. À l'intérieur, parce que, comme nous le verrons dans le chapitre sur le rôle de l'architecture dans les pratiques interdisciplinaires, les membres de l'institut n'étaient pas d'accord sur la façon d'agencer les espaces du nouveau siège. À l'extérieur, parce que des voisins s'étaient opposés à la venue du SFI dans la zone résidentielle qui était la leur. Les riverains craignaient, en effet, un trafic accru sur Hyde Park Road et conseillaient que le SFI s'installe plutôt dans des zones commerciales[608] ; que l'institut, du fait d'une possible faillite financière, puisse revendre l'édifice à une entreprise qui ne respecte pas les règles de voisinage[609] ; et que l'impact architectural défigure la « greenbelt effect »[610] entourant la résidence Hurley. En imaginant un *think tank* gouvernemental, certains avaient peur qu'il grandisse rapidement et amène des *spins offs*[611]. Le SFI répondit que : 1) ses événements les plus nourris auraient été organisés dans d'autres établissements en ville, 2) les zones commerciales n'étaient pas attractives pour le calme cherché par les scientifiques (« SFI got the experience of what worked and not worked at the convent. So it was searching for more a residential area, more meditative place » ; « People are happy to have that amazing view and to be in a place where they can concentrate on their research »[612]), 3) ses économies étaient solides, 4) son expansion architecturale aurait été moins invasive que les vingt-deux maisons qu'une compagnie immobilière aurait pu y construire à sa place, 5) et enfin que le règlement contraignant l'usage du terrain ne pouvait être changé par personne[**613**]. Le SFI alla même jusqu'à dire que la « pollution étudiante » aurait été moindre : « Student 'pollution'. Some serious students participate at SFI, but the number is small. Up to a dozen undergraduates during the summer, working under the mentorship of senior scientists »[**614**] ; et que de toutes façons, les membres de l'institut avaient un « pouce vert » : « SFI scientists have strong environmental, preservationist concerns »[615]. Cet ensemble d'arguments organisationnels, législatifs et écologiques eut prise sur une partie des habitants de Santa Fe. Durant la controverse, un ensemble de citoyens et citoyennes se levèrent en

[607] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[608] SFI, « S.F. Institute's plan worries neighbors, Bob Quick, The New Mexican », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[609] SFI, « Abell Presentation to Board of Adjustment », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[610] SFI, « Santa Fe Institute's proposal », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[611] SFI, « Appeals Delay Institute Closing. Tom Sharpe », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[612] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.
[613] SFI, « Abell Presentation to Board of Adjustment », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[614] SFI, « Informational Report. Santa Fe Institue Request for Special Exception. March 22, 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[615] *Ibid*.

soutien de l'institut, en envoyant des lettres aux journaux locaux[616] et au maire[617] : ils ou elles défendirent la renommée et le prestige du SFI, le faible impact architectural qu'il aurait eu et l'utilité sociale des « community lectures » organisées par l'institut. Puisque la majorité des lettres envoyées au maire, des votes du *Board of Adjustment* (un tribunal civil citoyen qui tranche sur les affaires de zonage urbain) et du conseil communal avaient été en faveur, l'institut put acheter la Résidence Hurley et s'y installer. L'acceptation de la part de la communauté, cependant, ne fut pas gratuite. Un certain nombre de restrictions s'imposèrent au SFI : pas de dortoirs pour les étudiants, pas de modification du style architectural « pueblo » et « adobe »[618], et surtout pas de laboratoires. Le code de la ville de Santa Fe empêchait, compte-tenu de la catégorie juridique de l'institut, toute installation de produits et d'activités dangereuses :

> « Any use or structure not specifically or provisionally permitted herein and any use or structure which the board of adjustment, on appeal and after investigation of similar uses or structures elsewhere, shall determine to be potentially noxious, dangerous or offensive to residents of the district or those who pass on public ways, by reason of odor, smoke, noise, glare, fumes, gas, vibration, threat of fire or explosion, emission of particulate matter, interference with audio or television reception, or radiation, or likely for other reasons to be incompatible with the character of the district »[619].

En dépit de ce que le premier statut du centre préconisait, le SFI assurait désormais qu'aucun laboratoire de sciences physiques, chimiques ou biologiques ne serait jamais installé : « No laboratory work involving chemicals or biological facilities nor any laboratories using radioactive or other hazardous materials shall be permitted on the Property »[620]. Devant le *Board of Adjustment*, Bruce Abell, vice-président du SFI à l'époque, fut encore plus explicite : « There are no laboratories at SFI nor any contemplated. Research is theoretical – the only experiments are conducted on whiteboards and computers. No chemicals. Nothing radioactive. No heavy equipment, no high-power machines »[621]. Quelle aurait pu être la trajectoire des SSC, s'il n'y avait

[616] SFI, « Santa Fe Institute's proposal », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[617] Par exemple : SFI, « Case #S.E. 1993-5. Patty J. Johnston to Mayor Sam Pick », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[618] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[619] SFI, « Santa Fe City Code. Land Development », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[620] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[621] SFI, « Informational Report. Santa Fe Institue Request for Special Exception. March 22, 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

pas eu cette controverse, dont aucun compte-rendu historique n'a fait mention jusqu'ici ?

*Encadré 6. Le SFI et la question de l'*Info Mesa

Dès le début, les *Senior Fellows* ont misé sur le développement des sciences computationnelles pour le SFI. L'informaticienne Erica Jen confirme cette direction au milieu des années 1990 : « Computer simulations, dit-elle en 1996, are the wave of the future »[622]. Au cours de son histoire, les développements computationnels du SFI ont éveillé l'intérêt de plusieurs compagnies de la Silicon Valley, qui ont maintes fois supporté ses recherches à travers un apport matériel (Thinking Machines Corporation, Motorola, IBM ou Intel pour un workshop en 1993[623] ou Amazon, eBay, Yahoo et Microsoft pour un autre en 2008[624]). La zone de Santa Fe a aussi fait parler de soi, au début des années 2000, parce qu'un certain nombre d'entreprises informatiques y ont été fondées. Le journaliste Ed Regis publia un article sur *Wired*[625] et un livre[626] pour lancer le nom d'*Info Mesa*[627], censé défier ou du moins enrichir le panorama occupé par la Silicon Valley (San Francisco) et la Silicon Alley (New York). Écrits avec un ton plus qu'enthousiaste, ces textes partent du constat que l'avalanche de données en biologie, pharmacologie ou en économie nécessite de nouveaux outils pour être traités. Un lieu inattendu, fameux pour ses galléries d'art, pour sa communauté New Age et pour ses coyotes, est selon lui le berceau d'une nouvelle vague de compagnies informatiques : une douzaine y développe ces nouveaux outils, parmi lesquelles *Bios Group* de Stuart Kauffman et *Prediction Company* de Doyne Farmer. Le SFI lui-même est cité comme l'un des principaux acteurs de la *Mesa*, bien qu'il ne fasse pas de profits. Interviewé par Regis, Kauffman contribue à relever le *hype* : « I'm told that Santa Fe feels like what Silicon Valley felt like 10 years ago »[628]. Pourquoi Santa Fe donc, qui ne dispose même pas d'un aéroport international ? Parce que, Regis répond, à Los Alamos l'emploi de l'ordinateur remonte à l'époque du développement de la bombe H : « as the Los Alamos lab developed the hydrogen bomb, it relied increasingly on supercomputers to calculate the paths of explosive shock waves and the effects of other nonlinear phenomena »[629]. Une année plus tard, le journaliste free-lance John German écrit un article semblable sur un magazine local de *business*[630], ce grâce à quoi il sera embauché comme chef des éditions au SFI quelques années plus tard. Quatorze ans après, toutefois, la bulle se dégonfle, et un journaliste de l'*Albuquerque Journal* explique pourquoi l'*Info Mesa* n'a pas réalisé ses promesses :

> « Info Mesa was built on brilliant ideas and some software. The nice thing about a software startup is you need only enough money for 'a couple of computers and a coffee maker' to implement and prove your idea, Elling [un des pionniers de l'Info Mesa] said. […] If you decide to build a company that sells software to end users, you are talking about a whole different level of investment, and a need for talent beyond great science and programming. You need salespeople, marketing, finance, technical support. […] Even if a company takes that route, marketing, sales, manufacturing, finance, legal and customer service talent is in short supply in New Mexico but abundant in California. That's no knock on New Mexico. It's just a function of California's much larger population and much longer experience. […] »[631].

---

[622] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 11.
[623] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 35.
[624] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 31.
[625] Regis, E., « Greetings from Info Mesa », *Wired Magazine*, 06.01.2000, https://www.wired.com/2000/06/infomesa/.
[626] Regis, E., *The Info Mesa : Science, Business, and New Age Alchemy on the Santa Fe Plateau*, New York, WW Norton & Co, 2003.
[627] « Mesa » en espagnol signifie table ou, comme dans ce cas, plaine.
[628] Regis, E., « Greetings from Info Mesa », *Wired Magazine*, 06.01.2000, https://www.wired.com/2000/06/infomesa/.
[629] *Ibid*.
[630] German, J.D., « The Info Mesa », *New Mexico Business Journal*, September 1, 2001.
[631] Quigley, W., « Why Santa Fe's 'Info Mesa' stalled », *Albuquerque Journal*, Sunday, December 6th, 2015, https://www.abqjournal.com/686738/why-sfs-info-mesa-didnt-become-a-silicon-valley.html.

Le rôle du capital social et symbolique des fondateurs

Abordons maintenant la question du prestige des fondateurs. En faisant un bilan des premières années de vie du SFI, Cowan endosse la casquette du sociologue et illustre le processus de légitimation de la notion de complexité à travers les noms prestigieux qui composent l'institut :

> « The issue of complexity has been popping up everywhere. The Santa Fe Institute has given it a little more credibility, I think, because the names attached to it are prestigious. We have a roster of National Academy types and Nobel winners, which suddenly did something very important for the whole notion, that is, to make it look more respectable »[632].

Ce qui revient à dire que, même si la notion n'en est pas une (comme ne cessent de le déclarer les fondateurs eux-mêmes dans les bulletins), la simple renommée de ceux qui l'utilisent suffit à la rendre crédible. L'exemple suivant renforce davantage l'évidence de la forte conscience des dynamiques sociales qui caractérise la direction du SFI. Les personnalités à enrôler étaient, en effet, ouvertement choisies sur la base de leur capital symbolique : « We were picking the people, not the topics »[633]. Lors d'une des rencontres fondatrices, Metropolis conditionne la réussite même de l'entreprise à la seule présence de quelques grands noms : « I would like to make sure that a half dozen super-stars are dedicated to coming. Then with that you can go to donors and try to get started »[634]. D'autant plus qu'au prestige s'ajoutait l'atout du capital social, que ces personnalités pouvaient maintenant mettre au service du SFI : « [Gell-Mann, Pines, etc.] knew everybody. They could just pick up the phone »[635].

Le prestige des fondateurs attirera pendant toute la vie de l'institution des chercheurs et des chercheuses porteurs d'un important capital culturel et social, des porteurs d'« excellence » selon le langage indigène. Cela n'empêche pas de se poser de manière plus générale la question de la prosopographie et des trajectoires des membres se réclamant des SSC. Lorsque le SFI s'ouvre aux postdoctorants, ce sont des chercheurs et des chercheuses difficilement classables qui atterrissent à l'institut. Ils ou elles trouvent dans les SSC un refuge, alimentaire et stratégique, temporaire ou pérenne. Par exemple, David Feldman, qui à la fin des années 1990 travaille sur un sujet à cheval entre la physique et l'informatique, se réjouit de l'environnement « anticonformiste » et interdisciplinaire du SFI. Pendant son séjour, il témoigne de ne pas avoir ressenti de pressions sociales à l'égard de la légitimité de ce qu'il faisait. Soit le récit du

[632] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 5.
[633] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 8.
[634] SFI, « Concluding Comments, October Workshop », boîte d'archives « SFI Board Meetings September 9, 1984-March 9, 1986 ».
[635] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 8.

journaliste freelance qui écrit dans le bulletin à son propos : « An energetic researcher, Feldman calls his experience working at SFI 'awesome', mostly because of the interdisciplinary nature of the place. He says he never had to answer the question 'Is what I'm doing physics? […] »[636]. Les scientifiques qui perçoivent l'environnement du SFI comme familier, ce sont des gens qui se sentent à l'étroit dans les espaces académiques traditionnels. Cela véhicule à la fois la fascination de l'explorateur et le charme de l'innovateur incompris. Par exemple, l'histoire de Walter Fontana[637] est représentative de nombre d'autres :

> « In the early 1990s, Fontana spent two years at SFI as a postdoctoral fellow. He returned toward the end of that decade, giving up tenure at the University of Vienna to spend six years as a research professor at the Institute. The move allowed him to escape the problem of extracting space and money from institutions and funding agencies set up along traditional disciplinary boundaries. It's a dilemma all too familiar to researchers who not only straddle disciplines, but also bridge conceptually and empirically driven research »[638].

Si les fondateurs se présentaient comme des physiciens ou des chimistes éclectiques, les nouveaux entrants se caractérisent plus par leur frustration vis-à-vis des « limitations des approches traditionnelles »[639] que par un *habitus* d'hommes ou de femmes de la Renaissance. Ginger Richardson, ancienne secrétaire et responsable de la section éducative du SFI, reporte le parcours de John Miller :

> « John Miller attended the first summer school in 1988. He also was the Institute's first postdoctoral fellow. His ensuing career accomplishments and long-term SFI connections make him an SFI education program poster child. Now a Professor of Economics and Social Science at Carnegie Mellon, he has spent several extended residencies here. For the past 20 years he has, with Scott Page, co-directed our Graduate Workshop. The central scientific theme of this program, computational social science, has become a subfield for which Miller is certainly among the world's pioneers. His success, along with the examples of many other SFI postdocs, belies the founders' early worries that a segue into complexity science could be a career killer. In fact, the Institute's postdocs consistently move into leadership positions in academia, research, and industry »[640].

---

[636] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 11.
[637] Doctorant à l'Institut de chimie théorique de l'Université de Vienne, Fontana arrive au SFI comme postdoctorant en 1989 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 20.
[638] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 22.
[639] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1, p. 6.
[640] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, p. 45.

Le récit de Richardson finalement s'accorde avec ce qu'avait écrit en 2003 Goldberg par rapport à la mission du SFI d'explorer des nouveaux territoires :

> « The Institute, incorporated in 1984, was meant to serve the research community by fostering and facilitating 'risky' science by investigators who were courageous enough to collaborate with scientists from other fields in order to tackle difficult issues that could not be addressed in more traditional academic settings »[641].

Relu dans cette perspective, le message de Richardson signifie : nous avons réussi notre mission, nous formons l'élite d'aujourd'hui et de demain. En réalité, le problème du recrutement des chercheurs et des chercheuses qui passent par l'institut a toujours représenté une préoccupation pour le SFI. Lambert Williams se dit surpris par l'affirmation que l'un de ses interlocuteurs lui avait confié : « you can publish one week in finance, and the next week in statistical physics »[642]. Ensuite il mentionne quelques exemples de personnes ayant rencontré des problèmes après leur séjour au SFI précisément pour cette appartenance à plusieurs domaines :

> « This relative indeterminacy of pedagogical and professional profile for participation in complexity science […] means that later on there can be difficulties of re-integration. I have already mentioned the indeterminacy that greeted four shining stars when they left, and several prominent SFI researchers essentially vanished from view when their time there was up. Occasionally, SFI postdoctoral fellows who secure posts in traditional departments have vast persuasive work to do, for instance in demonstrating that work done in 'sociophysics' has 'enough' physics. […] One informant […] [said :] 'this SFI-inspired way of doing things… is creating some epistemological no-man's land' »[643].

Rares sont les cas où des étudiants, ayant muri au sein du SFI, sont devenus des « stars » académiques par la suite. Le cas inverse est plus commun, celui de la captation des « excellences », à des stades de l'ascension dans le champ académique qui peuvent être différents : naissant (Duncan Watts, Mark Newman), moyen (John Holland, Stuart Kauffman) ou établi (les prix Nobel ou, plus tard, certains écrivains ou philosophes américains très connus). Mais le capital social des fondateurs de l'institut leur a permis, entre autres choses, d'œuvrer avec une certaine efficacité sur plusieurs plans. Un de ceux-ci relève d'une structure sociale peu visible, plus informelle, où l'amitié, l'estime personnelle et le lobbying se mélangent dans une sphère grise et indistincte. On n'en rend pas compte officiellement, mais il n'y a pas de problème si

[641] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 3.
[642] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, p. 165.
[643] *Ibid.*, pp. 166-167.

l'on en fait mention : il s'agit des contacts avec les agences fédérales et les multinationales.

Encadré 7. Nombre et nature des membres du SFI

En 1987, le conseil d'administration est déjà passé à 27 membres, dont des scientifiques, des entrepreneurs et des hommes politiques, comme l'ex-gouverneur du Nouveau Mexique de l'époque, Jack M. Campbell. Le conseil scientifique passe à 40 membres, certains recoupant le conseil d'administration[644]. Rejoignent le SFI notamment un autre lauréat du Nobel, Kenneth Arrow, ainsi que Manfred Eigen et Stephen Wolfram. Le programme des *Visiting Fellows* commence cette année-là, avec six membres, dont certains des fondateurs : Philip Anderson, Kenneth Arrow, Brian Arthur, John Holland, Stuart Kauffman et David Pines. Le programme, d'une durée d'un à douze mois, pourvoyait une indemnité d'hébergement, un bureau, du support à la recherche et un salaire. Le nombre des associés est celui qui croitra le plus au fil des années, en arrivant vite à une centaine de membres, qui auront comme seule prérogative celle de passer au moins une semaine par an à l'institut. Quant aux nationalités en présence, les Anglo-saxons, les Français, les Allemands et les Indiens sont les premiers à être représentés dans les listes du SFI. Peu à peu apparaitront aussi d'autres européens, des latino-américains et des israéliens, parmi lesquels certains fonderont ou rejoindront des centres de recherche sur les systèmes complexes ailleurs : Gérard Weisbuch, qui sera l'un des protagonistes des premiers pas des SSC en France et en Europe, séjournera plusieurs fois au SFI, à partir de 1990[645] ; Michel Morvan, fondateur en France avec Paul Bourgine du Réseau National des Systèmes Complexes en 2005, sera *external professor* de 2004 à 2013[646] ; Jean-Louis Deneubourg, membre du CENOLI de Bruxelles, est l'un des conférenciers invités à une rencontre sur la vie artificielle en 1992[647] ; Hughes Bersini, lui aussi du CENOLI, est parmi les visiteurs du SFI dans le premier semestre de 1991[648] ; ou encore, Eric Goles sera membre du comité scientifique de *Bios Group* de Stuart Kauffman en 1999[649], avant de fonder avec dix-huit autres scientifiques l'Instituto de Sistemas Complejos de Valparaiso au Chili en 2005[650]. La prépondérance des Américains ou des étrangers avec des postes aux États-Unis demeure jusqu'à aujourd'hui. En 1992, le SFI compte 35 personnes parmi les associés externes, provenant de plus de 20 institutions différentes situées entre les États-Unis et l'Europe[651]. En 1993 les membres monteront à 106[652], nombre qui restera à peu près stable tout au long de l'histoire du centre. L'*External Faculty* inclut en 2007 des membres provenant de 18 pays différents[653]. Aucun membre des internes ni des externes, ainsi qu'aucun postdoctorant, ne proviennent de Chine, où le SFI s'est pourtant investi dans l'organisation de plusieurs écoles d'été.

Les contacts avec les agences fédérales et les grandes entreprises

Les prix Nobel, de par leur *statut* dans le champ académique et dans le domaine public, mais aussi de par leur âge et leur riche histoire personnelle, possèdent un agenda rempli de contacts dans les organismes fédéraux (NSF, DoE[654]), dans le monde des grandes fortunes, des banques et des entreprises (Citibank, eBay), mais aussi des politiques et des *think tank* (RAND corporation). Leur capital social est déterminant

644 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 12-14.
645 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 14.
646 Curriculum Vitae de Michel Morvan.
647 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 26.
648 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 34.
649 http://www.sistemascomplejos.cl/es/eric-goles/.
650 http://www.sistemascomplejos.cl/wp-content/uploads/2011/10/MEMORIAISCV2006web.pdf.
651 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 28.
652 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 38.
653 SFI, *Santa Fe Institute 2009 Annual Report*, 2009, p. 6.
654 Le LANL est géré par le DoE et non pas par le département de la défense.

dans toutes leurs recherches de fonds : « These people, dit la bibliothécaire Margaret Alexander, had connections, lots of connections »[655].
Les premiers financements décrochés chez la NSF sont issus d'une rencontre organisée par Cowan entre les *Senior Fellows* et Erich Bloch, le directeur de l'agence. L'avantage des financements de la NSF était leur souplesse en termes de contraintes bureaucratiques ; comme le dit Richardson : « DoE fundings were based on programs. NSF money was pretty flexible. I was the one who did the annual report for NSF and it was essentially a compendium of everything we did »[656]. Malgré l'absence d'une section dédiée aux projets interdisciplinaires, Bloch trouva une solution pour dégager des financements pour le SFI : « taxing each of the divisions in order to provide $250,000 a year in support of the Institute »[657].
Les relations avec Bloch ne furent pas les seules qui assurèrent le support économique de la part de la NSF au centre de recherche. Comme le déclare Edward Knapp : « Perhaps my connections with the Federal government stemming from my days at the NSF and at URA helped us »[658]. De même, le contact avec Robert Eisenstein, lui aussi fonctionnaire de la NSF, est jugé comme fondamental, non seulement dans le démarrage de l'institut, mais aussi en ce qui concerne sa persistance. Eisenstein sera président du SFI pendant une année en 2004-2005 ; au début de cette expérience il fut introduit de la manière suivante :

> « Eisenstein brings those qualities to the presidency of an institution he's known for some 10 years. Early on during his tenure at the NSF, he was responsible for directing many of the funds that came to SFI from there. The NSF was at that time the Institute's largest source of research funding. Over the years, it seems, Eisenstein has watched the Institute with an appreciative eye »[659].

Un détail sur son changement de carrière nous paraît important :

> « After 22 years of academic research and teaching, he made a major shift into the public sector, taking a job as director of the Physics Division of the National Science Foundation (NSF), where he later took a leadership role as one of NSF's seven assistant directors. Heading the Mathematical and Physical Sciences Directorate, he and a staff of 135 were responsible for funding – at universities and colleges all over the United States – a wide variety of research projects in the fields of astronomy, chemistry, materials research, mathematics, and physics »[660].

[655] Entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
[656] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[657] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 145.
[658] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 10.
[659] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 4.
[660] *Ibid.*

L'interdisciplinarité, selon Eisenstein, était difficile à financer ailleurs qu'au SFI :

> « While at the NSF, he saw a number of attempts to bring together disciplines, but they very often failed. 'The NSF leadership knew that wonderful things would happen if you brought together, say, physics and biology, so they would form an evaluation panel, but when it came to distributing funds, a physicist would say something like, 'We can't support that, there's too much biology', and a biologist would say, 'We can't fund that, there's too much physics'. The structure of SFI allowed it to avoid those issues. It really was a proxy for NSF in this respect. People could do things here that we had trouble doing there' »[661].

Le rapport entre Eisenstein et les dirigeants du SFI s'intensifie par la suite, sous la présidence de Goldberg pendant les années 1990 :

> « His interest in uniting scientific disciplines led him to initiate and maintain a dialog with Ellen Goldberg during her presidency at SFI. 'He wanted to find out about SFI first hand', says Goldberg, who was impressed that an NSF director would take such a personal approach »[662].

Cowan exhibe donc une fausse surprise lorsqu'il se dit impressionné par la décision de la NSF de conférer des financements en blanc-seing à l'institut :

> « Cowan relates, still with a bit of surprise in his voice, that the National Science Foundation and Department of Energy agreed to give blanket money to SFI, money that could be used as the scientists saw fit. 'They'd never done that before', says Cowan. He's still impressed by how much influence the people involved had »[663].

Des dynamiques semblables sont observables aussi dans les rapports du SFI avec le monde privé. Le PDG de la banque Citigroup, John Reed, sera l'un des premiers grands financeurs des projets de recherche du SFI : « It's ironic that with all the physicists in the founding group, the first big money that came in was for economics. The funding came from Citibank : $250,000 to study the global economy »[664]. Reed cherchait[665] des nouveaux modèles pour appréhender la finance globale et éventuellement éviter de pâtir des pertes comme celles qu'il avait subies peu avant :

---

[661] *Ibid.*, pp. 4-5.
[662] *Ibid.*, p. 5.
[663] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 10.
[664] *Ibid.*, pp. 9-10.
[665] « My understanding is that John sat out George, it wasn't the other way round » : entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.

> « Citigroup […] held billions of dollars of bad loans. To address Citigroup's predicament, and to better understand the dynamics of a highly interconnected network of economies, Reed decided that ideas and points of view from beyond neoclassical economics were needed. Perhaps, he thought, the more holistic, yet still rigorous, view of the scientists at the fledgling Santa Fe Institute […] would provide a framework for a deeper understanding »[666].

Cowan relate la manière dont John Reed est entré en ligne de mire du SFI, une autre contingence qui fait virer les centres d'intérêt de l'institut des sciences de la vie vers l'économie :

> « September 1987 saw the Institute agenda expand beyond biology and into economics. The motivation was not simply intellectual. It was a topic of interest to one of the nation's leading bankers who offered to fund an economics program at SFI. It all started when Bob Adams, a member of our board and head of the Smithsonian Museum in Washington, discussed SFI with John Reed, then head of Citicorp. Bob suggested that John come to Santa Fe with a few of his staff to talk about some of the problems in international finance that his company was attempting to solve »[667].

Les agences fédérales et les grandes entreprises ont joué un rôle important pour lancer l'institut et, comme on le verra en détail dans l'Aparté 1, pour maintenir sa légitimité scientifique aux yeux du monde entrepreneurial. Les dispositifs éducatifs ont servi, quant à eux, à établir l'agenda de la science de la complexité et à disséminer des adeptes partout dans le monde.

Encadré 8. Les présidents du SFI

1. George Cowan : 1984-1991
2. Edward Knapp : 1991-1996
3. Ellen Goldberg : 1996-2003
4. Robert Denison (intérim) : 2004
5. Robert Eisenstein : 2004-2005
6. Ellen Goldberg (intérim) et Geoffrey West (intérim) : 2005
7. Geoffrey West : 2005-2009
8. Jeremy Sabloff : 2009-2015
9. David Krakauer : 2015-actuel

Les écoles d'été et d'hiver, puis les MOOC : construire l'identité d'une science

Dans une optique foucaldienne, Kate Bulpin et Susan Molyneux-Hodgson ont mis en évidence l'importance des dispositifs éducatifs dans la création de nouveaux domaines

[666] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 27.
[667] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 148.

de recherche[668]. En prenant en compte le concours iGEM dans la biologie synthétique, les auteures ont examiné comment un dispositif pédagogique autre que la licence peut socialiser les étudiants aux nouvelles pratiques épistémiques, techniques et idéologiques d'un domaine. Pour ce qui concerne les SSC, en l'absence de licences universitaires, nous prendrons en considération les écoles d'été et les autres dispositifs pédagogiques que le SFI a mis en place à partir de la fin des années 1980.

Conçue par Peter Carruthers[669], la première Complex Systems Summer School (CSSS) est lancée en 1988. Mike Simmons, vice-président des affaires académiques, et le physicien Daniel Stein, étudiant de Philip Anderson, en sont les chevilles ouvrières[670]. Stratégiquement, Simmons en fait une occasion d'accélérer les activités de l'institut vers la recherche en systèmes complexes et pour maintenir « la position du SFI à l'avant-garde de ce nouveau champ excitant de la complexité »[671]. Stein affirme, de sa part, que la dimension de l'école est nationale : « The school is part of a nation-wide effort to promote our understanding of nonlinear complex systems »[672]. Organisée avec le support de plusieurs centres de recherche, universités et agences fédérales[673], cette première école se tint au Lycée Saint John, loué pour l'occasion[674]. Gratuite sauf pour les chercheurs et les chercheuses confirmés, elle l'est restée jusqu'à la crise de 2008. Les premiers participants furent une cinquantaine (surtout des étudiants d'Anderson[675]) : il y avait à la fois des doctorants et des post-doctorants, provenant de tous les États-Unis. Les disciplines convoquées – physique, biologie, informatique, mathématiques et économie – le furent dans une optique de croisements mutuels[676]. Une séance atelier, pour assurer aux participants la prise en main des logiciels numériques, fut organisée. La publication des actes dans un livre chez Addison-Wesley fut également prévue. Le SFI publia au total une demi-douzaine de volumes issus des écoles d'été, avant que l'investissement ne lui paraisse plus rentable[677]. Une bonne partie des futurs outils ou des sous-domaines récurrents des SSC était déjà présente lors de la première édition : chaos, dynamique non-linéaire, classeurs, réseaux de neurones, automates cellulaires, verres de spin[678]. Deux ans plus tard s'ajouteront la morphogenèse de plusieurs systèmes naturels, les approches cognitives dans l'étude du

[668] Bulpin, K. & Molyneux-Hodgson, S., « The disciplining of scientific communities », *Interdisciplinary Science Reviews*, 2013, vol. 38, n. 2.
[669] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 4.
[670] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, pp. 16-18.
[671] *Ibid.*, p. 16.
[672] *Ibid.*, pp. 16-17.
[673] Parmi ceux-ci, le Center for Nonlinear Studies du LANL, l'Université de l'Arizona, l'Université de l'Illinois, l'Université du Nouveau Mexique, l'Université du Texas, le DoE, la Research Corporation for Science Advancement et la Fondation Alfred Sloan.
[674] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 19.
[675] Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
[676] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, pp. 16-17.
[677] Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
[678] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 19.

cerveau[679] et la criticalité auto-organisée de Per Bak[680]. Les sujets enseignés ont varié au cours du temps, mais ils ont toujours inclut à la fois des méthodes établies et des recherches en cours[681].
Lors de la deuxième édition de la CSSS, sous la direction de la mathématicienne du LANL Erica Jen[682], les sponsors augmentèrent considérablement : le nombre d'universités qui cotisent s'accrut[683]. Cette seconde édition réussit à décrocher des aides importantes : des bourses du DoE, de la NSF, de l'Office of Naval Research et de la Research Corporation ; tandis qu'Apple Computer, Sun Microsystems et Precision Visuals fournirent de manière bénévole du matériau informatique[684]. En 1991, le SFI déclare avec fierté : « American universities may not be ready for interdisciplinary research, but their students are »[685].
L'institut a attribué, dès le début, une importance fondamentale aux écoles d'été, non seulement pour former des adeptes, mais aussi pour fixer le standard des SSC. Par exemple, en 1991, le SFI affirme que le rôle des publications issues des écoles d'été est de structurer le domaine : « the [SFI Lectures in Complex Systems] series' cumulative effect is not only to record what has already been done in the field but also to contribute to defining complexity's future evolution »[686]. En 1992, Stein attribue au dispositif des *Summer Schools* le rôle de fondation de la discipline de la science de la complexité :

> « The original, and still primary, idea of the School is to provide a concrete manifestation of the notion that a new science of Complex Systems has emerged. While many of the topics can be found individually in some university courses or other summer schools, there is no other school which tries to bring together such an outlandishly varied assortment of problems, approaches, and subjects under a unifying idea »[687].

Trois ans plus tard, les CSSS sont vues comme la preuve de l'existence d'une science de la complexité : « The Complex Systems Summer School, now in its eight year, embodies the notion that a new science of Complex Systems has emerged »[688]. Mais Daniel Stein nous dit que personne ne savait ce que c'était cette « science », dont la définition n'était pas précise :

---

[679] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 16.
[680] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 15.
[681] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 37.
[682] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 23.
[683] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 15.
[684] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 12.
[685] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 12.
[686] *Ibid.*, p. 14.
[687] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 36.
[688] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 6.

« We didn't even know what it was. To present them I wrote a sentence that now is widely used. I took it from a movie where a judge says, 'I don't know how to define pornography, but I know how to recognize it when I see it'. And I used that sentence in the first book. We don't know how to define complexity, we know it when we see it »[689].

En traduisant en termes sociologiques ce qu'expliquera en 2014 Ginger Richardson, l'école d'été a fait fonction de lieu de socialisation aux SSC : elle l'est encore aujourd'hui, car pendant notre terrain nous avons rencontré des doctorants italiens et français qui venaient de passer par là. Cependant, Richardson pense à l'école comme à un espace où étudier les travaux des représentants principaux du domaine et où les postdoctorants de l'institut peuvent conduire leur première expérience d'enseignement :

« CSSS is a community-building event. The summer school alumni roster reads like a Who's Who in complexity science. Lecture invitations strengthen existing faculty relationships and draw new collaborators. SFI undergraduate interns get their first immersion in the field, and postdoctoral fellows gain teaching experience there. Many of our postdocs come to us through the portal of CSSS »[690].

En 2010, Jim Rutt, *Chair* du *Board of Trustees* de l'institut, arrive à définir l'école comme l'instrument de propagande le plus puissant parmi ceux mis en place par le SFI :

« He sees a growing number of people and institutions thinking in an 'SFI way'. He believes this is partly due to what he calls SFI's 'most powerful propaganda platform' – the Complex Systems Summer School. Well over a thousand students have participated since its debut in 1988, he explains. 'Each brings the SFI mode of thinking back to his or her home institution' »[691].

Si le public des étudiants se diversifie au fil du temps en termes de disciplines et de nationalité[692], d'autres paramètres, tels que le siège du lycée ainsi que le nombre d'étudiants, sont restés presque toujours les mêmes. Après 2008, le SFI se trouve obligé à demander des frais d'inscription :

« In 2011 the education program ceased to be supported by internal funds. Fortunately, we were able to transition successfully from underwritten support to

[689] Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
[690] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, p. 45.
[691] SFI, *Santa Fe Institute 2010 Annual Report*, 2010, p. 14.
[692] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 24, p. 26.

tuition-based programs without losing enrollment or diluting student quality. All direct education costs are now covered by course tuition, program-specific grant awards, or externally supported scholarship programs »[693].

Le succès de l'école d'été amène l'institut à en organiser une version hivernale en janvier 1992 à Tucson, Arizona[694]. Elle sera la première d'une longue série. Au début des années 2000, la direction des affaires académiques se pose un nouvel objectif : étendre son influence à l'international. Dans le contexte du *SFI's International Program*[695], une école d'été est organisée à Budapest, pour cibler les étudiants de l'Europe de l'Est[696]. En 2005, le même programme se tourne vers la Chine, notamment vers l'Université de Qingdao dans la province du Shandong, où la première d'une série d'écoles d'été est organisée[697]. Le SFI en organisera six, en réussissant, d'après l'un des responsables de ces écoles, à étaler son influence dans le pays :

« The US community was highly influential in East Asia. SFI has associations with these people. If you look at Schools of Systems Science, which is popular now in China, the people who are running these schools are people that we knew ten, fifteen years ago. The director of one of the biggest Systems Science schools used to be one of our instructors at the summer schools. Another was John Holland's student »[698].

En 2007, le SFI en organise une aussi à Bariloche, en Argentine[699].
Vingt ans après la fondation de l'institut et quinze ans après la première école d'été, Melanie Mitchell, professeure d'informatique à l'Oregon Graduate Institute à Portland, tisse son bilan des CSSS. Elle se réjouit du fait qu'au début de son histoire, l'école attirait des étudiants qui n'avaient pas bien claire l'identité des SSC et que maintenant ils arrivent avec une connaissance accrue du domaine, grâce au fait que celui-ci aurait atteint un niveau de crédibilité scientifique satisfaisant :

[693] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, pp. 47-48.
[694] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, pp. 16-17.
[695] « While SFI has always drawn scientists from all over the world into collaboration, the new International Outreach Program will stretch the Institute's influence across the globe allowing for further expansion of its cross-generational, transdisciplinary research community. Resulting from a generous grant from a private supporter, Bill Melton, the program will provide research professors, postdoctoral fellows, and advanced graduate students from targeted emerging countries greater opportunities to expand their research agendas to include interdisciplinary research and enhanced theoretical and experimental programs. […] The first year of the project targets researchers in China, India, and Russia. Year two will be focused on expanding to Eastern Europe and some of the Southern Hemisphere countries in South America and Africa » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1, p. 28.
[696] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 27.
[697] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2005, Vol. 20, Number 1, p. 12.
[698] Entretien avec William Tracy, 05.10.16.
[699] SFI, *Santa Fe Institute 2008 Annual Report*, 2008, p. 17.

> « When SFI started its Complex Systems Summer School 15 years ago, complexity science was brand new and the students who made the pilgrimage to Santa Fe didn't quite know what they were about to get into. All that has changed, says Melanie Mitchell, who has directed the summer school for the past several years. Complex systems research is now more widely accepted in the scientific culture, she says. Students often come to the program with a sophisticated understanding of the research, in some cases having taken courses in complex systems at their own universities. 'Some of our own summer school students have now become professors, and they're starting to offer courses in complex systems', says Mitchell »[700].

Et Daniel Stein d'établir son bilan : « One of the things I'm proudest of is that most of the people at SFI today did the summer schools. If I have to say what's my greatest contribution to complex systems, it is not papers, it's the summer schools. I think they did a lot to spread the word »[701].
Le dernier dispositif éducatif concocté par le SFI concerne les MOOC, les cours en ligne accessibles à tous et à toutes :

> « In late 2012, the Institute announced that it is going global by offering a series of Massive Open Online Courses in complexity science. The first course, designed to reach anyone anywhere who is interested in learning more about complex adaptive systems, was taught in early 2013. It required no prerequisites or background in math or science – only an interest in complexity science and a willingness to participate. More than 6,400 people participated. […] Topics included dynamics, chaos, fractals, information theory, self-organization, agent-based modeling, and networks »[702].

Nous n'avons pas de données suffisantes sur le rôle et l'impact des MOOC pour en dire davantage. Ils représentent toutefois une nouvelle manifestation de la stratégie de légitimation du SFI et des SSC par le biais des dispositifs éducatifs. Nous dirons même que, si la plupart des stratégies abordées ici visent surtout à légitimer le SFI, la CSSS vise surtout à légitimer les SSC comme nouvelle discipline ou comme nouveau domaine de recherche.

Les workshops intégratifs

Les workshops ou ateliers intégratifs sont fondamentaux au début de l'histoire du SFI pour lancer les premières collaborations scientifiques. Ces cycles de rencontres représentent même la seule activité de l'institut jusqu'en 1986.

[700] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 9.
[701] Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
[702] SFI, *Santa Fe Institute 2012 Annual Report*, 2012, p. 12.

Pour obtenir les premiers financements importants, Herbert Anderson propose au conseil scientifique du SFI d'organiser des workshops réunissant des chercheurs et des chercheuses en sciences dures et en SHS : cela ne se fera pas tout de suite. Le workshop fondateur sur les CAS, intitulé « Founding Workshop on Complex Adaptive Systems », se tint en juillet 1986, avec le soutien de l'Alfred Sloan Foundation[703]. Dans la lignée de ce cycle de rencontres, Gell-Mann et Pines se chargeront d'organiser périodiquement des workshops afin de trouver des points communs aux objets d'étude spécifiques, sous le parapluie du concept de CAS : « These, explique Simmons, draw participants from each of the more specialized programs and keep us all thinking about the broad themes, the common threads that run through the entire program of the Institute »[704].

En septembre 1987, Anderson co-organise avec le prix Nobel de l'économie, Kenneth Arrow, un cycle sur l'« économie globale »[705], intitulé « Founding workshop on Evolutionary Paths of the Global Economy ». Ce cycle de rencontres vise à contribuer à la construction de modèles macroéconomiques de la finance internationale[706]. Le financement provint de la Russell Sage Foundation et de John Reed, chef exécutif de la Citicorp. Ce workshop donna l'envolée à l'institut, en bénéficiant d'un important retentissement dans la presse.

Plus ou moins pluridisciplinaires, les workshops du SFI ont toujours porté sur les thèmes les plus divers : archéologie, entropie et physique de l'information, immunologie théorique, cyber-sécurité, inégalités socio-économiques, unification de l'écologie, etc. Encore aujourd'hui, l'institut organise plus d'une vingtaine de workshops par an[707]. Ce dispositif a fortement structuré l'existence socio-épistémique du domaine des SSC, mais qui a également contribué à créer une certaine mythologie du SFI comme étant un lieu d'extrême liberté intellectuelle. Dans le bulletin de l'automne 1993, le mathématicien australien Marc Feldman, après avoir défendu le pouvoir heuristique des échecs, se réjouit de l'ouverture d'esprit des membres du SFI et tisse l'éloge de l'environnement intellectuel stimulant qui le caractérise[708]. Simmons, trois ans plus tôt, donnait la description suivante de la démarche de l'institut :

> « We get people together for as long as possible, a week or even two, in an atmosphere of considerable informality. The talks are 'highly interruptible' and stimulate lively multi-party exchanges. I imagine this is a bit frustrating for the

[703] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 16.
[704] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 10.
[705] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 24.
[706] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, p. 12.
[707] SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 2.
[708] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 30.

speaker, at least at first. But if we've chosen a sufficiently fascinating and important problem, and the right mix of people, then something important emerges »[709].

Le SFI se configure ainsi comme un tisseur de liens entre chercheurs et chercheuses d'institutions, disciplines et pays différents. En 2014, la vice-présidente des affaires académiques Jennifer Dunne[710] vantera précisément cette caractéristique de l'institut : « With the early programs in complexity economics and adaptive computation, for example, the Institute quickly established itself as the incubator for science that challenges conventional wisdom and addresses previously unasked questions »[711]. En effet, la plupart des recherches pour lesquelles le centre s'est fait connaître avaient commencé à être menées ailleurs.
Les workshops n'étaient pas le seul moyen de construire des collaborations, même s'ils apparaissent comme les plus efficaces. Pour donner un exemple d'un autre dispositif, on citera Richardson qui décrit une initiative que le SFI a organisée pour élargir ses corps professoraux internes et externes, le *Bring Your Own Buddy* :

> « Most of our visitors come in response to invitations from our residential and external faculty. But they also find their way to the Institute on their own initiative using an open application process available on our web site. Approximately one-third of our visitors are first-timers at SFI. […] In a new effort to attract first-time visitors, this summer we have scheduled a July integrative themes workshop which will bring our scientific community together to address fundamental issues of simplicity and complexity in natural and social phenomena. […] But there is an additional twist to the meeting, a BYOB – Bring Your Own Buddy – component. Each SFI participant has been asked to invite a non-SFI 'buddy', an individual who hasn't before been involved with the Institute but who is pursuing research which may complement SFI's emerging research foci »[712].

En conclusion de cette section, il est intéressant de noter un élément stratégique du SFI par rapport au choix de la thématique de certains workshops et programmes de recherche organisés au cours des premières années. À côté des sujets de recherche les plus inédits, l'institut a toujours financé des recherches plus conventionnelles. Lorsqu'au tout début la définition de CAS n'était pas claire ni consensuelle, les financeurs devaient être convaincus autrement de la solidité scientifique du centre : le prestige de certaines personnes rassure la NSF et le DoE, mais cela ne suffit pas. Le premier workshop organisé par le SFI, sous la direction de Gell-Mann et Slansky, a

[709] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 10.
[710] Elle est arrivée au SFI en tant que postdoctorante en 2000 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 31.
[711] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, p. 1.
[712] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 28.

lieu en novembre 1985 et porte sur les supercordes[713]. Un groupe important de biologistes sera réuni autour du projet de la « matrice de bases de données » à la fin des années 1980[714] et se prolongera jusqu'aux premières années 1990, en s'inscrivant dans le Human Genome Project. Troisième et dernier exemple, les programmes sur l'étude immunologique sur le sida[715] ou sur la recherche computationnelle d'un vaccin contre cette maladie[716], constituent un élément récurrent dans l'histoire du SFI.

Les publications scientifiques

Venons-en aux publications scientifiques. Dès mars 1987 le SFI tisse une collaboration avec la maison éditoriale Addison-Wesley Publishing Company, pour la publication d'une série de livres intitulée *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity*[717]. La série inclut les actes des colloques, les monographies et les actes des écoles d'été. Dans le cinquième bulletin, en 1989, la personne chargée des éditions, Ronda Butler-Villa, explique l'importance de ces publications dans un article intitulé « Getting the Word Out » : « the publications program provides the only tangible evidence of what is being accomplished [at the SFI] »[718]. Butler-Villa entre dans les détails : généralement, les volumes sont imprimés à hauteur de 1500 exemplaires, dont la moitié se vend au cours des six premiers mois, tandis que l'autre moitié se trouve dans les librairies. Aucun volume n'a jusque-là franchi le seuil symbolique des dix milles exemplaires pour pouvoir parler de *bestseller*. L'année d'après, Knapp confirme, par le biais des ventes éditoriales, l'importance du dispositif de la CSSS qui nous a occupé dans la section précédente : « the books that come out of these summer programs are becoming standard texts for the sciences of complexity »[719]. La stratégie éditoriale est appelée à changer en 1992, dans le but de réduire les coûts et d'augmenter l'efficacité des publications[720]. En 1994, les livres publiés sont déjà 50[721], mais l'énorme coût nécessaire pour l'édition de ces livres, finalement peu vendus, fera réduire leur publication au fil du temps. Le contrat avec Addison-Wesley se terminera en 1997 ; dès janvier 1998, les publications seront prises en charge par Oxford University Press[722]. Richardson relate qu'au fil du temps l'importance de ces publications a décliné : « these volumes lost with the time their value. And it used to take a lot of time to produce them. At least 24 months leg between the actual talk and

[713] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 16.
[714] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 4.
[715] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 16.
[716] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2012, Vol. 26, p. 28.
[717] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 10.
[718] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 3.
[719] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 11.
[720] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 13.
[721] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 24.
[722] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 6.

the production of the volume. As time went on, there were many new ways to spread the word »[723].

En ce qui concerne les articles scientifiques, dans la section « Publications » du bulletin de l'automne-hiver 1991, l'institut mentionne le nombre croissant des publications spécialisées effectuées par les membres affiliés : 28 en 1990 et 31 en 1991[724]. En 2007, le cinquième président du SFI, Geoffrey West, souligne l'« excellence scientifique » des membres de l'institut par le prestige des revues où ils publient :

> « Although SFI is dedicated to risk-taking and supporting more speculative investigation, our researchers continue to be published and recognized in leading scientific journals. For example, in 2006 we had 20 articles in *Nature* and *Science*, arguably two of the most important scientific journals in the world »[725].

Et si à *Nature* et *Science* on ajoute les *Proceedings of the National Academy of Sciences*, en 2007 le total des articles dépasse les cent unités[726]. Par ailleurs, de leur côté, les revues *Nature* et *Science* manifestent sans ambages un support enthousiaste envers le SFI :

> « The journal *Nature* touted SFI as a place where 'through the interaction of talented people there may well arise new visions of how the world is put together', and *Science* described it as an intellectual playground where scientists knocked around new ideas 'like volleyballs' »[727].

De manière apparemment surprenante, l'accent mis sur les publications scientifiques est, au moins dans les bulletins, bien moindre que l'attention des médias pour le SFI. En réalité, nous savons que l'arène médiatique est celle qui est la plus investie par l'institut.

Les journaux scientifiques

En 1990, Simmons annonce la fondation d'un journal scientifique sur les systèmes complexes[728]. L'année d'après, le lancement du journal *Complexity* est annoncé de manière plus concrète : son directeur éditorial sera le biologiste Harold Morowitz[729].

[723] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[724] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 35.
[725] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 1.
[726] SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 7.
[727] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 4-5.
[728] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 11.
[729] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 3.

Casti l'accompagnera en tant qu'éditeur exécutif, tandis que John Wiley imprimera et diffusera la revue[730]. Simmons présente le journal de la manière suivante :

> « Even as complexity is emerging as a new field of research, it is in danger of fragmenting into a number of disjoint subfields that will not communicate adequately with each other because each will be served by its own specialized journals. The result might be that the common threads and integrative aspects of the emerging sciences of complexity would be lost »[731].

Le journal n'est pas pour ceux et celles qui, dans une discipline, proposent un nouveau modèle ou une nouvelle théorie, comme il ne vise pas non plus à fournir une maison aux nouvelles approches, telles que les algorithmes génétiques ou la vie artificielle[732]. Pour ces domaines, dit le SFI dans le bulletin, des nouveaux journaux spécifiques étaient en train d'être fondés. *Complexity. An International Journal of Complex and Adaptive Systems* se pose donc comme l'espace d'intégration entre les différents domaines, avec pour but une théorie commune des systèmes complexes[733]. Conçu comme un journal trimestriel, international et à terme complètement électronique, il débutera ses publications en 1995. Toutefois, il n'aura pas de succès, d'autant plus que le projet d'une théorie intégrative des systèmes complexes sera abandonné par la suite. Déjà Lambert Williams avait remarqué l'insuccès de ce type de journaux : « By and large this failed to bear fruit, and while there are journals devoted 'purely' to complexity […] it is striking how little SFI researchers tend or want to publish in them »[734]. David Wolpert donne sa raison sèchement : « Because nobody reads [them] »[735].

Les sociétés savantes

De manière étonnante, le seul instrument de légitimation que le SFI n'a pas investi, parmi les classiques qui existent depuis fort longtemps dans l'histoire des sciences, est le dispositif des sociétés savantes. Une *Complex Systems Society* existe bel et bien au niveau international[736]. Mais elle est une extension de la société européenne des systèmes complexes, fondée en 2004 par un ensemble de chercheurs et de chercheuses surtout français, anglais et italiens. Lancée à Turin avec la *European Conference of Complex Systems*, la CSS devient internationale en 2015 pour y inclure le SFI, qui paraît s'y investir très faiblement. Lors de la première conférence internationale de la

[730] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 3.
[731] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 17.
[732] Dans la foulée, la publication en mars 1993 des deux premiers numéros du journal trimestriel *Artificial Life*, dirigé par Christopher Langton, est annoncée dans le bulletin de l'été 1994 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 3.
[733] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 18.
[734] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, p. 171.
[735] Entretien avec David Wolpert, 06.10.16.
[736] https://cssociety.org/about-us.

CSS à Phoenix, Arizona, les deux communautés découvrent leurs différences et leur relative étanchéité, comme le reporte le physicien Ciro Cattuto, l'un des protagonistes des SSC européennes :

> « Pour la première fois on a vu les deux âmes qui retournaient au même endroit, et on a vu une différence culturelle en quelque sorte, on a discuté beaucoup […] mais n'importe qui disait, 'Hum […] je savais pas qu'ils étaient comme ça', des deux côtés, tu vois ? […] Mon impression c'est que c'était deux lignes qui avaient bougé de manière indépendante en quelque sorte et donc qu'elles avaient pris des trajectoires différentes. […] En termes de narration […] [l]'impression qui m'est restée c'est la manière très très différente d'argumenter la validité et l'importance de ce qui a été fait […] Le mode américain me semblait plus autoréférentiel, plus lié à l'histoire […] du Santa Fe. Le mode européen était plus choral, c'était une narration beaucoup plus décontractée, bien moins commémorative […] 'Mais oui, l'histoire c'est l'histoire, qu'est-ce qu'on fait pour aller de l'avant ?' »[737].

Au-delà de la possible rivalité entre les deux groupes, ce témoignage confirme ce que notre matériau montre de manière générale : à savoir un investissement du SFI plus à l'échelle locale et nationale qu'à l'échelle internationale, voire globale. En même temps, si les communautés européennes des SSC essayent effectivement d'encourager des liens entre les pays du continent et entre l'Europe et la communauté américaine, c'est surtout le SFI qui s'est intéressé à l'Asie pour y diffuser le domaine qu'il a fondé.

Les Community Lectures et les rapports avec la ville de Santa Fe

Lors de la controverse citoyenne sur la résidence Hurley, le SFI fut accusé de ne pas être suffisamment ouvert à la ville et de ne pas être suffisamment reconnaissant vis-à-vis de son voisinage[738]. En réalité, dès 1987, l'institut avait organisé des conférences, gratuites et ouvertes à quiconque, destinées à la communauté locale de Santa Fe, dans l'objectif affiché d'augmenter « la compréhension du grand public de la nature des sciences de la complexité et de leur importance pour la société actuelle »[739]. Après les délicats rapports avec la communauté de la ville de Santa Fe, l'institut intensifia ce genre d'activités culturelles. L'investissement du SFI sur le territoire est une manière de montrer son attention envers la ville, non seulement au nom des bonnes mœurs des institutions non-profit, mais aussi pour garder la faveur de la communauté locale.

Si en 1987, ces conférences ne sont qu'en nombre de deux, tenues par Kauffman et Morowitz, elles deviendront beaucoup plus nombreuses au fil du temps. Le SFI s'ouvrira à des scientifiques et à des thématiques externes à son corps professoral et à

[737] Entretien avec Ciro Cattuto, 17.02.17.
[738] SFI, « Abell Presentation to Board of Adjustment », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[739] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 10.

ses centres d'intérêts. En 1988, il est question de psychobiologie et de super-conductivité[740]. Dix ans plus tard, il s'agira de comètes et d'astéroïdes, d'entomologie, ainsi que de l'impact des biotechnologies sur la société depuis un point de vue philosophique[741]. Les invités seront souvent prestigieux : en 1994, le Prix Nobel Francis Crick tint une conférence intitulée « How do we see things ? » pour aborder des questions neurobiologiques[742] ; ou encore, en 1998, le Prix Nobel de la physique Lee Smolin intervint avec une conférence intitulée « The Life of the Cosmos »[743]. Puis des écrivains, des compositeurs, des philosophes[744], ou encore des historiens des sciences (comme Peter Galison), des psychologues, des politistes ou des écologues, participeront à ces conférences en tant qu'orateurs[745].

Nous avons assisté à l'une de ces conférences, le 26 septembre 2016. Le régime discursif de l'introduction du président Krakauer puis de l'intervention du *speaker* Seth Lloyd, intitulé « Birth, collapse, and rebirth at The Information Age »[746], était délibérément ludique. Le conférencier ne présentait pas ses dernières recherches, mais tissait un tableau historique large et pédagogique de tout un pan de connaissances acquises. Le public se composait dans l'écrasante majorité de personnes âgées à la retraite, pour la plupart des anciens et des anciennes scientifiques des laboratoires limitrophes, mais aussi des représentants du monde des galeries d'art : après New York et Los Angeles, Santa Fe est en effet la ville la plus importante des États-Unis pour le marché de l'art.

Les projets éducatifs pour étudiants et postdoctorants

La panoplie des agencements éducatifs par lesquels le SFI assure son existence socio-épistémique se prolonge, par rapport aux écoles d'été et d'hiver, avec un dispositif moins de masse par rapport à ces dernières, mais plus long et intensif.

Le premier programme pour les étudiants de premier et deuxième cycle est organisé par le SFI au printemps 1990[747]. Les étudiants pouvaient participer à l'un des programmes de recherche menés par l'institut, ou bien à une période d'étude sous le guide d'un membre du SFI (résident ou externe, ou bien postdoctorant)[748]. En 1991 le SFI donne la possibilité aux étudiants, ayant terminé les cours pour leur doctorat, de conduire au sein de l'institut leur recherche, ainsi que de rédiger leur thèse, en bénéficiant de la supervision d'un des membres en résidence ou externes[749].

---

[740] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 24.
[741] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, pp. 2-3.
[742] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 5.
[743] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 3.
[744] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 21.
[745] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, pp. 26-27.
[746] https://www.santafe.edu/news-center/news/ulam-lectures-lloyd-announce.
[747] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 17.
[748] *Ibid.*
[749] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 17.

Avec le temps, ce programme s'institutionnalise et les démarches, ainsi que les thématiques de recherche (liées à l'étude informatique des systèmes complexes), se spécifient davantage. En 2002, le programme est financé par la NSF et se structure autour d'un thème librement choisi par le candidat, qui doit rester en résidence deux mois et demi, et qui doit préférablement posséder des compétences mathématico-computationnelles préalables :

> « SFI has a limited number of research openings for undergraduate interns during summer 2002. Through an NSF Research Experiences for Undergraduates Program at SFI, students can work with a faculty mentor on an individual project focusing on some aspect of the computational properties of complex systems. […] This program is highly individualized. Each student works with one or more faculty mentors on a specific self-selected project. Participants are expected to be in residence approximately 10 weeks, from about mid-May to mid-August. Internships may be part- or full-time, although it is likely that most summer students will hold full-time positions. […] Mathematical or computational skills or experience […] are favorably considered. […] Send a current resume, transcript of grades, and a statement of your current research interests and what you intend to accomplish during your internship »[750].

Les programmes postdoctoraux sont plus importants et plus encadrés. Dans la section dédiée aux nouveaux postdoctorants du bulletin de l'hiver 1995-1996, on dispose de la durée et de la mission liée à ces postes : « These residencies usually last one to three years, and, as they move on, these scholars become some of the Institute's most effective spokespeople for spreading the Institute's multidisciplinary approach to other institutions »[751]. Pierre Omidyar, patron d'eBay, s'est investi tellement dans le SFI que, au-delà de son support financier et de son adhésion au conseil d'administration du centre, il implémente dès 2008 un programme de financement de bourses postdoctorales non-fléchées au sein de l'institut[752]. Quelle que soit la discipline, le candidat a carte blanche pour mener ses recherches sur un sujet de libre choix, pendant deux ou trois ans, avec la supervision d'un des membres du SFI. Le programme devient prestigieux et les chercheurs et chercheuses qui y passent se transforment en ambassadeurs des SSC :

> « The Omidyar Fellowship plays a central role in SFI's creative, open intellectual environment. This highly selective postdoctoral fellowship brings to SFI fresh ideas from many fields, prepares fellows to be leaders in transdisciplinary science,

[750] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 15.
[751] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 16.
[752] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 51.

contributes to SFI's research agenda, and spreads SFI's methodologies to scientific institutions around the world »[753].

Mais les projets éducatifs ne se limitent pas aux étudiants de troisième cycle. À partir d'une certaine époque, le SFI s'est décidé d'investir aussi les niveaux scolaires antérieurs à la licence.

Les projets d'éducation dans les lycées

Durant l'année académique 1992-1993, le SFI lance son premier programme d'éducation dans les lycées[754]. Supporté par une bourse de la Pinewood Foundation, l'institut se donne trois objectifs : faire connaître l'étude des systèmes complexes aux étudiants, encourager les minorités ethniques et les femmes à entreprendre une carrière scientifique, ainsi que diffuser les valeurs de la science parmi les plus jeunes. Une soixantaine d'étudiants de tous les lycées de Santa Fe participèrent à un cycle de conférences tenues par une poignée de membres de l'institut. Les rencontres, qui duraient une heure et demie, se sont faites au rythme d'une fois par mois, et prévoyaient un temps de discussion pour répondre aux questions des étudiants.
Un autre dispositif, initié en 1998 et reproduit plusieurs années, impliquait l'usage des MBA pour apprendre aux étudiants à programmer. Le modèle employé dans le projet dans les lycées s'appelle Starlogo[755] et a été développé au MIT par Mitchel Resnick pour apprendre aux étudiants la « pensée décentralisée » :

> « What is the simplest way to teach high school students the concepts of complexity ? The Santa Fe Institute believes one answer lies in a hands-on approach and a computer modeling tool known as Starlogo software. This summer 10 teachers and 10 students from the area's public and private high schools will spend two weeks at the Santa Fe Institute using Starlogo software to develop simulations of decentralized systems such as traffic jams, ecosystems, and ant colonies. Starlogo software, developed by Mitchel Resnick of the Massachusetts Institute of Technology (MIT) Media Lab in support of his research on decentralized thinking, is an excellent teaching tool because users can model their ideas without first having to learn a complicated programming language »[756].

Starlogo est un modèle simple, mais ce qu'on attend des étudiants à l'issue de ce programme comporte tout de même une certaine quantité de travail : « All workshop

[753] SFI, *Santa Fe Institute 2010 Annual Report*, 2010, p. 9.
[754] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 34.
[755] « Described simply, Starlogo software presents a large number of active agents, called 'turtles', with the ability to move in any direction over a patchwork grid that represents the local environment » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1998, Vol. 13, Number 2, p. 3.
[756] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1998, Vol. 13, Number 2, p. 2.

participants are expected to produce a poster, computer model or models, written description, and web site for their exploration »[757].
Quelques années plus tard, les activités dans les écoles s'étendent à des élèves encore plus jeunes et visent à former des centaines d'enseignants à l'emploi d'outils computationnels pour introduire leurs classes aux sciences, aux technologies et aux mathématiques :

> « *New Mexico Adventures in Modeling : Integrating Information Technology into the Curriculum through Computer Modeling Approaches* project will for the next three years train New Mexico science, mathematics, and technology teachers at the secondary level (grades 6-12). The teachers will integrate IT concepts and computer modeling – especially of complex adaptive systems (CAS) – into their courses. They will use Star-Logo simulation software, participatory simulations with handheld computers, and related computer technologies. […] SFI […] has introduced computer modeling and simulation through CAS and its supporting software tools to over 300 teachers in the last five years. […] An important part of this project will be the creation of a permanent group of successful 'teacher implementers' in local schools »[758].

En 2009, la présentation du programme sur les bulletins est enrichie d'un élément de contexte important : puisque les emplois du futur se trouveront dans les technosciences[759], le SFI prévoit que le rôle des SSC dans le XXI^{ème} siècle sera central[760]. C'est à ce moment-là, en 2008 précisément, que le *New Mexico Adventures in Modeling* se transforme en GUTS : « Growing Up Thinking Scientifically »[761].

Les prix scientifiques et autres reconnaissances

Parmi les ressorts classiques de toute stratégie de légitimation en science, il y a les prix et les autres formes de reconnaissance scientifique.
Déjà dans le bulletin de 1987, on mentionne le prix MacArthur de la fondation homonyme accordé à Stuart Kauffman. La *conditio sine qua non* pour citer de tels prix est l'appartenance du récipiendaire au corps professoral du SFI, non pas le fait qu'il ou elle soit récompensé pour un travail mené dans le domaine des SSC[762]. Par exemple, un encadré du bulletin de l'été 1997 est dédié au prix que Philip Anderson reçut en février de la même année. Le *John Bardeen Prize* lui fut attribué pour des sujets traités antérieurement au SFI et aux SSC : « the understanding of broken symmetry, the order parameter in the A and B phases of superfluid helium three, and the role of impurities

[757] *Ibid.*, p. 3.
[758] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 7.
[759] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 42.
[760] *Ibid.*
[761] *Ibid.*, p. 43.
[762] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 10.

in metallic superconductors »[763]. Dans le bulletin de l'hiver 2002, une section appelée « Recognitions » est entièrement dédiée à toute typologie de reconnaissance attribuée à des membres du SFI, cela pour montrer non seulement la légitimité de la recherche qui s'y fait, mais aussi pour mettre en lumière le fait que passer par le SFI peut être un bon point à marquer dans son CV pour sa carrière future[764]. Les autres formes de reconnaissance scientifique, outre les prix (à la carrière, pour le meilleur article scientifique, etc.), passent par la nomination d'un chercheur à la *National Academy of Science*[765], par l'obtention d'une médaille[766], par l'obtention d'une bourse de recherche importante, même par une simple marque d'estime reçue par un journal national d'un autre pays[767], ou par l'inclusion, de la part du *Time Magazine*, dans la liste des cent personnes les plus influentes du monde[768].

Une proposition de périodisation de l'histoire du SFI

Toute périodisation historique est critiquable, car elle suit des critères et des logiques qui peuvent toujours être remis en discussion. Pour l'histoire d'une institution comme le SFI, l'historien ou l'historienne pourrait suivre une logique plutôt épistémique ou thématique, et définir les périodes selon les sujets de recherche dominants à chacune d'entre elles. Un critère plus architectural pourrait être choisi, en sectionnant l'histoire de l'institut selon les bâtiments qu'il a occupé au fil des années. La prise en compte des présidents représentent encore un autre critère valide. Ce que nous allons proposer de faire ici, c'est de suivre *grosso modo* les présidences, tout en mobilisant les autres aspects et en montrant les chevauchements et les exceptions. Nous commençons, toutefois, par présenter la proposition de périodisation d'un membre du SFI, qui a souhaité rester anonyme. Après avoir établi que les critères suivis concernent la « qualité de la science en termes de rigueur et d'innovation », la « santé financière et administrative », « la vision du leader » et l'« impact sur les bourses, sur la politique et sur l'éducation », notre informateur ou informatrice propose sa chronologie :

> « Phase one (Cowan with Knapp following on) : The aspirational founding of the shining city on the hill. Exalted vision, great enthusiasm, rigor, deep commitment to the mission.
> Phase two (Goldberg followed by Eisenstein) : Exploration and expansion. Consolidation of foundational ideas, outreach to new domains and audiences. Fiscal expansion[,] some purging of original members.

[763] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2, p. 17.
[764] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 22.
[765] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 24.
[766] *Ibid.*
[767] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 22.
[768] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 0.

Phase three (Geoff West) : Gilded Age but also Great Depression. Lessening of clear commitment to original philosophy. Debatable staff choices and low morale. Indiscriminate search for mega funds. Crash of 2008 and fiscal peril to SFI.
Phase 4 (David Krakauer) : The phoenix rises. Original vision invoked but much broader in disciplinary scope. Almost all original faculty and staff gone. Less internally and more externally focused to global issues. Less aspirational, more sophisticated in both good and negative sense of the word »[769].

Les jugements de valeur mis à part, il s'agit d'une périodisation qui capte un certain nombre d'éléments importants de l'histoire du SFI, tout en ayant évidemment des limites, parmi lesquelles le fait qu'elle oublie la phase de lancement de l'institut. Voici donc notre proposition de périodisation.

1) Nous identifions une *première phase* allant de 1982 à 1987. C'est la phase de définition et de la mise en place de l'institut. Les protagonistes sont les fondateurs et un nombre très restreint de non-scientifiques, qui aident avec la collecte des fonds (Art Spiegel) et les aspects organisationnels (Ginger Richardson). La seule idée claire des fondateurs est la volonté de faire de la science interdisciplinaire, où l'ordinateur ait une place centrale, pour donner vie à des nouveaux domaines de recherche. Seulement après plusieurs *brainstorming* et débats, la complexité est repérée comme la thématique fédératrice. Dans cette phase, les disciplines convoquées sont la physique, la chimie, l'informatique, les mathématiques, la biologie, l'économie et l'archéologie[770]. Se définit le projet de trouver une théorie générale des systèmes complexes pour fonder une « science de la complexité ». L'institut n'a pas encore un siège définitif et ses seules activités de recherche sont des workshops multidisciplinaires.
2) La *deuxième phase* commence en 1987, avec la location du couvent de Cristo Rey, et se termine en 1996, après le déménagement à Hyde Park Road. En mars 1991, Cowan laisse le poste de président à Knapp[771], dont la direction marque une continuité avec celle de Cowan. L'équipe des fondateurs s'enrichit de quelques chercheurs provenant d'ailleurs que le LANL, tels que Brian Arthur (présent au workshop entre physiciens et économistes), Stuart Kauffman, John Holland[772] et Christopher Langton. L'école d'été, les bulletins, les publications chez Addison-Wesley et le journal *Complexity* sont lancés avec le but de fonder

[769] Mail d'un anonyme.
[770] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 14.
[771] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 17.
[772] Puisque Holland est « reconnu comme étant le leader dans les algorithms génétiques, un agenda de recherché dominante au Santa Fe Institute », il est choisi pour donner la première *Stan Ulam Memorial lecture* : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 1. Pour une définition de l'*Ulam Lecture* : « Each year the Ulam Lecture series features one of the founding thinkers in the sciences of complexity who revisits his or her body of work from a broad perspective, and especially considers its long-term implications and future directions » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 14.

la science de la complexité et, par le même mouvement, la disséminer. Les premières nouvelles disciplines, approches et outils sont lancés (vie artificielle, économie de la complexité, algorithmes génétiques). L'objectif d'une théorie générale des systèmes complexes se consolide et se complète de la notion de « système complexe adaptatif », telle qu'elle est illustrée et portée par Holland. Ce dernier augmente son influence sur les directions scientifiques du SFI au fil du temps, grâce à son groupe de disciples – Melanie Mitchell, Stephanie Forrest et Christopher Langton – que Mike Simmons surnommera la « Mafia de Michigan »[773]. La fameuse formule « the edge of chaos », inventée par Norman Packard[774] et vulgarisée surtout par Langton[775] et Kauffman[776], devient un autre élément fondamental du jargon de l'institut. Elle apparaît notamment dans les sous-titres de plusieurs livres de vulgarisation sur le SFI. Vers 1992, la direction du SFI s'efforce d'enrôler davantage de représentants des SHS[777] : en 1994, elle se réjouit d'avoir réussi à embarquer le psychologue cognitiviste Roger Shepard et d'avoir réuni plus de chercheurs en SHS que des sciences dures à l'une des rencontres du programme « Crude Look at the Whole »[778]. Plusieurs articles de journal et plusieurs livres de vulgarisation créent le mythe du SFI. Le budget et la visibilité de l'institut augmentent rapidement d'année en année[779].

3) La *troisième phase* va de 1996 à 2004. La présidence d'Ellen Goldberg marque un changement sensible et réfléchi sous tous les aspects de la vie de l'institut[780]. Il ne faut pas tomber dans l'erreur, toutefois, de tout faire porter à la seule présidente. D'abord, parce que la mise en place de cette mission passe par plusieurs exécutants, dont la plus visible est Erica Jen, post-doctorante appointée chef des affaires académiques pour accompagner Goldberg dans les réformes et dans le recadrage général de la recherche et de l'image du SFI. Deuxièmement, Goldberg a été choisie par les conseils d'administration et scientifique, et a été chargée par ceux-ci de poursuivre une mission précise : rétablir l'image de l'institut après les attaques reçus par plusieurs bords. En 1995, le journaliste scientifique John Horgan publie sur *Scientific American* un article au vitriol, visant à délégitimer le SFI dans son ensemble en attaquant surtout ses membres les plus en vue – décrits comme des prometteurs habiles –, ses programmes de recherche computationnels, ainsi que les chercheurs extravagants, comme le hippie mystique Christopher Langton, qui voit dans ses

[773] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 3.
[774] Packard, N., *Adaptation Toward the Edge of Chaos*, Urbana-Champaign, University of Illinois Press, 1988.
[775] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 10.
[776] Kauffman, S., *The Origins of Order*, *op. cit.*
[777] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 16.
[778] *Ibid.*
[779] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 3.
[780] Par exemple, SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 14.

simulations l'expression d'une nouvelle forme de vie[781]. En 1992, l'anthropologue Stefan Helmreich conduit son terrain à l'institut et, quelques temps après, fait circuler un *working paper* qui annonce le contenu de ce qui sera son livre, issu de sa thèse de doctorat à Stanford. L'image qui sort du SFI n'est pas des plus flatteuses : un machisme chrétien et raciste y serait souverain et serait inscrit dans l'épistémologie et dans l'ontologie des simulations qui s'y pratiquent[782]. Ce n'est pas un hasard si à la même époque commence à paraître dans les appels d'offre de l'institut la formule : « Women and minorities are encouraged to apply »[783]. Le *working paper* de Helmreich avait déjà alerté la direction du biais de genre. En outre, dans une rencontre entre Stuart Kauffman et John Maynard Smith à la Société Linnéenne de Londres, le biologiste anglais critique les SSC de ne pas s'ancrer suffisamment dans la réalité : « My problem with Santa Fe, is that I can spend a whole week there… and not hear a single fact »[784]. Sa critique visait surtout la théorie mathématique de Kauffman lui-même, appelée « modèle NK », visant à décrire mathématiquement un paysage biologique adaptatif rugueux, et la théorie de la criticalité auto-organisée de Per Bak. Dans un tel contexte, le choix de Goldberg remplit plusieurs fonctions. Elle est, tout d'abord, une femme. De manière additionnelle, elle est une microbiologiste et peut donc veiller à ce que l'institut renforce ses programmes de recherche dans les sciences de la vie[785] : pour l'introduire, Cowan reprend la main sur l'éditorial et explique que, lors des discussions fondatrices regroupant les *Senior Fellows*, ceux-ci souhaitaient asseoir l'institut plus sur la biologie que sur l'économie. D'après Cowan, l'arrivée de la première possibilité de fondation privée, issue de la Citicorp, reconfigura les priorités des fondateurs et recadra la thématique des premiers workshops en direction de l'économie, dans l'objectif de la compréhension des marchés[786]. Troisièmement, la nouvelle présidente vient de la voisine Université du Nouveau Mexique, où elle a fait preuve de bonnes capacités administratives et pédagogiques, ayant été professeure, *Associate Provost* et *Dean of Graduate*. Elle n'a jamais travaillé sur des thématiques proches du SFI, ni elle l'a jamais fréquenté auparavant, exception faite pour la courte période – précédant sa nomination comme présidente – passée au sein de l'*advisory board* de l'institut[787]. On lui confie la mission de rendre plus rigoureuse la recherche qui y est menée, d'élargir les

[781] Horgan, J., « From complexity to perplexity », *op. cit.*
[782] Helmreich, S., *Silicon Second Nature*, *op. cit.*
[783] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 19.
[784] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 25.
[785] L'intérêt pour la biologie est évident dans le bulletin de l'hiver 2003, où un article présente un projet sur l'innovation dans les processus évolutifs. L'arrivée des Big data est exploitée pour analyser mathématiquement les nouveaux flux de données biologiques : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 21.
[786] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 0.
[787] *Ibid.*, p. 1.

décisions aux scientifiques membres[788] et surtout de se débarrasser de certains fardeaux de l'époque précédente. Parmi ceux-ci, Christopher Langton et la vie artificielle, mais aussi Per Bak et Stuart Kauffman, parmi les plus actifs dans l'alimentation d'un *hype* considéré désormais comme nocif pour l'institut. En outre, tant avec Langton qu'avec Kauffman, la direction avait eu des affrontements par rapport à leur activité d'entrepreneurs[789]. Cowan aussi adresse un rappel à l'ordre à ceux qui auraient été trop avides : « My sense of the interests of SFI people is that economics is not necessarily first and foremost on their minds. If they wanted to make money, they'd probably be doing something else »[790]. Sous le guide de Goldberg et de Jen, l'objectif d'une science de la complexité, unifiée par une théorie générale des systèmes complexes, est abandonné ouvertement, tant dans les discours officiels que dans les programmes de recherche. À sa place, nous trouvons des programmes de recherche multidisciplinaires, focalisés sur des concepts transversaux à plusieurs domaines de recherche. Le but est de trouver des langages communs ancrés sur des thématiques particulières. Une forme de tendance unificatrice reste, donc, mais change de cible et d'ambitions. Goldberg prend les distances du concept même de complexité, tout en le jugeant utile comme catalyseur[791]. La complexité, pour l'institut, n'est toutefois pas le seul concept dont il faut prendre les distances. Une chercheuse du SFI, par exemple, affirme que « elle utilise souvent des concepts comme 'le bord du chaos' lorsqu'elle visualise l'économie dans son esprit, mais qu'elle n'utiliserait jamais de tels termes dans un article scientifique »[792]. Afin de corriger l'image d'un institut faisant de la recherche considérée par certains comme « flaky »[793], le discours de Goldberg adresse le souci du sérieux et de l'utilité de la science produite par le centre qu'elle dirige. On observe une accentuation des efforts de collaboration entre théoriciens et expérimentalistes. Par exemple Tom Kepler, vice-président des affaires académiques, dans le bulletin de l'automne 2000, se pose la question : « So how does work on complex adaptive systems become manifest in the world? […] While the SFI product is still largely theoretical, as well it should be, two recent public lectures point out promising directions for putting theory into practice »[794]. Financièrement l'institut connaît une expansion considérable, mais c'est surtout son image scientifique qui se consolide autour de la théorie des réseaux, grâce au passage de Mark Newman

[788] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, p. 144.
[789] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.
[790] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 4.
[791] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2, p. 28.
[792] *Ibid.*, p. 29.
[793] « To be fair, the writers were at least, in part, only picking up on and publicizing the optimism voiced by the SFI pioneers » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 5.
[794] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 33.

et Duncan Watts en tant que postdoctorants, et par la physique statistique, portée par la personne du physicien brésilien Constantino Tsallis. Le centre se retrouve à être engorgé de financements et de requêtes d'affiliation. La priorité devient donc celle d'étendre le campus en construisant des nouveaux espaces, ce qui se fera avec l'achat d'une résidence qui sera nommée *Cowan Campus* en 1994[795].

4) En 2004, après une période intérimaire où l'institut est dirigé par Robert Denison, Robert Eisenstein devient le président[796]. Malgré son ambition de « bousculer les choses un peu »[797], il ne représente, selon nous, qu'une *phase de transition* : censé rester au moins cinq ans, il est forcé de partir au bout de quinze mois. Les mécontentements généraux concernaient 1) sa politique de recherche, jugée peu innovante et perçue comme trop liée aux deux premières périodes, 2) ses dépenses qu'il n'aurait pas su bien gérer, 3) son caractère qu'on considère comme solitaire, 4) sa présidence jugée moins démocratique que celle de Goldberg et 5) sa collecte de fonds perçue comme insuffisante[798].
5) Après quelques mois qui voient le retour de Goldberg pendant quelques mois pour les affaires courantes, Geoffrey West[799], au début président intérimaire lui aussi, devient le sixième président en 2005, marquant nettement une *quatrième phase* dans l'histoire du SFI. Tout en considérant la science de la complexité comme acquise, plus pour garantir une continuité à la marque de fabrique du SFI, West prolongera et accentuera la tendance unificatrice initiée par Goldberg, en ciblant des concepts comme la robustesse ou le vieillissement, et en les faisant aborder par des scientifiques provenant de disciplines différentes[800]. Le terme de CAS disparaît et celui de réseau le remplace[801]. Dans le même mouvement, l'inter- ou transdisciplinarité est mise en avant comme la

[795] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 0.
[796] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 0.
[797] *Ibid.*, p. 2. En particulier il est chargé de minimiser les prétentions sur les CAS et de rendre plus concrète la recherche : « 'It's important for SFI not to let our reputation go to our heads. Leadership might mean something different now than it did then'. He pauses, as though knowing he's moving into trickier political territory. 'I'm in favor of high-quality interdisciplinary work: whether it involves CAS, matters less. […] 'We have to be making real contributions, not just be a place where smart people hang their hats' » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 6.
[798] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, pp. 146-147.
[799] Geoffrey West a tissé des relations avec le SFI très tôt, d'abord en côtoyant ses collègues du LANL. Son nom apparaît dans les bulletins pour la première fois en 1992, lorsqu'il est parmi les membres du SFI qui participent au cycle de conférences sur les sciences dans les lycées de Santa Fe : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 34. Enfin, il collabore, pour la première fois au sein de l'institut, avec Jim Brown en 1996 pour enquêter sur les propriétés scalaires de la physiologie des organismes vivants : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 7. Il entre dans le conseil scientifique du SFI en 2000 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 24.
[800] « The emphasis will be on identifying case studies – biological, ecological, computational, and physical – of robust systems, and then constructing from these case studies a general theoretical framework to be validated against empirical data » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. C.
[801] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 9.

vraie identité du SFI, la complexité passant en deuxième plan[802]. En outre, il y a sous West un renouveau d'une sous-partie de la théorie du chaos, celle des fractales de Mandelbrot, qui est à cette époque très souvent citée dans les bulletins et dans les projets de recherche de l'institut[803]. West est accompagné par le neurocognitiviste Christopher Wood, nommé vice-président avec des responsabilités en termes d'affaires académiques et administratives[804]. Ce duo se pose l'objectif d'œuvrer encore une autre réforme de l'institut et mène une enquête auprès des scientifiques pour collecter des idées sur les aspects organisationnels à recadrer[805]. Afin d'assurer une stabilité et une continuité aux activités de l'institut, et prévenir des déséquilibres financiers, West cherche des donations suffisamment larges pour constituer un fonds de dotation. Il s'agit d'un fonds spéculatif, dans lequel l'institut ne peut puiser qu'en cas d'urgence. Bien que cet objectif ne soit pas atteint, la renommée scientifique de l'institut grandit sur la base de l'impact de la théorie des réseaux, à laquelle contribuent plusieurs scientifiques basés dans différents pays, mais pour qui le SFI devient un point de passage obligé. Dans cette période, la plupart des chercheurs et chercheuses de tout grade relèvent des sciences de la vie, des mathématiques, de la physique et des sciences sociales. Avec le départ du groupe de Holland et de ceux qui travaillaient sur les automates cellulaires, comme Jim Crutchfield, les informaticiens purs se réduisent fortement en nombre[806].

6) L'anthropologue Jeremy Sabloff ne représente pas une véritable nouvelle période. Contacté par des membres de l'institut qui en appréciaient les capacités administratives et l'expertise dans la collecte des fonds[807], il n'opère pas des changements discursifs et institutionnels majeurs par rapport à West. Les programmes de recherche continuent avec la même approche que celle commencée sous la présidence de Goldberg, bien qu'ils s'enrichissent davantage de sciences sociales[808]. L'accent mis sur les sciences de la complexité et sur les CAS retourne à être plus fréquent[809].
7) David Krakauer représente certainement une *cinquième phase*, mais elle est trop récente pour qu'on puisse la caractériser précisément et en mesurer les impacts[810]. Krakauer, défini comme une « bête politique » par l'un de nos

[802] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, pp. 0-1.
[803] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 7.
[804] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, p. 8.
[805] « We spent a full week here interviewing absolutely everybody who wanted to be interviewed with respect to answering the following question : If today's SFI had not evolved over a 20-year period but instead were created new out of whole cloth, how would we organize it to enable it to run effectively? » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, p. 9.
[806] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, pp. 38-40.
[807] Entretien avec Paula Sabloff, 26.09.16.
[808] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2011, Vol. 25, p. 4.
[809] *Ibid.*, p. 13.
[810] « David synthesizes some of the ideas of precedent presidents. Like West he thinks that scientists should focus on their research and not on fund raising and grants. He's happy to have researchers from all level, not

interviewés, est déterminé à transformer le SFI davantage dans une sorte de *think tank*. Ses efforts se dirigent surtout vers le monde des entreprises, preuve en soit du renforcement du *BusNet* (voir Aparté 1) et de sa transformation en *ACtioN*. D'un point de vue épistémique, la tendance unificatrice semble s'accentuer sous la forme de la production de théories générales, non pas sur les systèmes complexes, mais sur des secteurs disciplinaires spécifiques. Le cadre général, tel qu'un *Aufhebung* hégélien, renoue avec, et vise à dépasser, le projet initial des fondateurs qui était celui de lancer une nouvelle discipline tout en abattant les murs disciplinaires. Krakauer se propose ainsi de créer une nouvelle transdiscipline[811].

Encadré 9. L'affaire Christopher Langton

De par son importance pour l'institut et au vu de sa figure considérée comme mythique par certains, Langton mérite qu'on s'y attarde quelque peu. Avec un passé de hippie, Langton n'a pas eu un parcours purement académique, et n'a jamais caché son penchant mystique, tandis que ceux et celles qui l'ont connu lui attribuent une attitude pacifique et inclusive[812]. Malgré le succès de son MBA appelé *SWARM*, la direction du SFI l'écarte dès l'arrivée de Goldberg :

> « Swarm has shown such promise at shedding light on research questions that it is now being used by some seventy-five academic and nonprofit sites and several score of businesses. […] The software package is helping private companies like Texas Instruments plan for competition in semiconductor sales. It is helping California researchers understand how forests reemerge after intense logging activity. A recent conference of Swarm users drew people from Johns Hopkins University, Coopers & Lybrand, Yellowstone National Park, the Naval Air Warfare Center, the Danish Hydraulic Institute, Sandia National Labs, and TRW Inc., among other businesses and institutions »[813].

En avril 1994, le SFI reçoit une bourse de 323.000 dollars de l'ARPA, l'agence américaine de recherche militaire, pour un projet de six mois autour du développement de *SWARM*[814]. L'ARPA et les services secrets se sont intéressés à *SWARM* en vue d'une application dans la gestion de l'armée :

> « [The objective is to solve problems] related to the way troops adapt to changing circumstances on the battlefield. The army wants to know how much local decision-making power troops on the ground should be given and how much of that decision-making power should remain in the hands of commanding officers »[815].

---

only seniors but also postdocs. Without saying what fields they have to be. He has an idea of the kind of partnerships SFI has to have. He can envision the future in a way that many of us cannot. He is also a researcher, he experiments, let's try this, let's try that. At a moment when some of the founders have died, the arrival of somebody as charismatic as David means a change to a new era » : entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.

[811] Le terme revient plusieurs fois dans les derniers bulletins publiés et dans les derniers reports annuels, même s'il n'est pas très bien défini.

[812] Par exemple le mathématicien Mike Coombs en parle ainsi : « He's one of the most unjudgmental people I've ever come across » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 21.

[813] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 19.

[814] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 8.

[815] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 21.

Cet intérêt gouvernemental pour le logiciel de Langton ne représente pas un avantage pour lui aux yeux de Goldberg, qui trouve ces financements « obscurs et effrayants »[816] ; ni, d'ailleurs, aux yeux des fondateurs et du conseil d'administration, qui se posaient dès le début l'objectif de réduire fortement les financements fédéraux, jugés comme trop contraignants thématiquement et bureaucratiquement. (D'ailleurs, Cris Moore nous a appris que cette agence fédérale a le pouvoir de révoquer le financement en cours de route[817]). Sur ces bases, les financements de l'ARPA (plus tard DARPA) seront tendanciellement évités par le SFI. Dans l'été 1997 Erica Jen illustre les nouvelles directions que prendra l'institut :

> « However, it has become apparent that (1) dependence on funding sources with strong programmatic missions has had in some cases a deleterious effect on the balance and priorities of Institute research ; and (2) there are, for some of the individual research grants sponsored through the Institute, significant issues of appropriateness of scientific content, coordination with the whole of Institute research, and even conflict of interest on the part of the individual researchers »[818].

À la fin des années 1990, l'arrivée de Starlogo de Mitchel Resnick du MIT signe une ultérieure prise de distance de Langton[819]. Un encadré du bulletin de l'été 1998 le montre bien : « While there is much interest in Swarm as a platform for future efforts […] there was also discussion of the value of continuing to model with a diversity of platforms »[820]. Les pressions et les prises de distance publiques vis-à-vis des chercheurs ciblés continuent sous d'autres formes. Dans un article du bulletin où l'on revient sur les résultats les plus importants du SFI, les deux résultats cités ne sont pas *SWARM*, ni le théorème NK de Kauffman, ni la criticalité auto-organisée de Bak. Cela du fait de leur manque d'intégration socio-scientifique :

> « It's fair to say that SFI works well when we are doing a good job at integration, and not so well when we are not. It's also clear that integration, and all the related aspects of building a new kind of community, require active effort on our part ; they don't just happen naturally. Two of the research results that represent SFI at its best – the artificial stock model developed by Arthur, LeBaron, Holland, Palmer, and Weber ; and the allometric scaling work by Brown, Enquist, and West – depended essentially for their development on a disciplined effort on the part of the collaborating researchers to merge their scientific agendas and perspectives »[821].

À cette époque, la direction de l'institut remet au centre du débat la nature et la durée des chercheurs en résidence. Au début, le compromis avait été trouvé sur le fait d'avoir la plupart des membres en dehors de l'institut et de garder en résidence, pendant plusieurs années, un petit nombre de chercheurs et chercheuses, capables de donner une continuité et une identité à l'institut. Cela fut le cas pour Arthur, Holland, Kauffman, Farmer, Langton et d'autres. Lorsque Goldberg et Jen sont appointées pour licencier ces chercheurs, elles semblent se retrouver dans un cul de sac. Elles voudraient pouvoir laisser la possibilité à certains membres de rester en résidence plusieurs années, mais en même temps n'ont pas d'autres moyens à agiter contre les chercheurs qu'elles veulent faire partir : « however, the elimination of the five-year professor category raises an important question : how do we ensure longterm scientific continuity at the Institute? »[822]. Quoi qu'il en soit, la direction décide de ne pas renouveler le contrat aux anciens, parmi lesquels Langton : « I'm pretty sure that Langton, Kauffman had reached that limit. It was a matter of, 'we're not gonna change the rules' »[823].

---

[816] « Ellen Goldberg decided not to take Darpa money anymore, because it was kinda dark and scary. One of the Darpa projects was to create kinda of a lottery. It was a way to predict terrorists strikes by doing a kind of a public lottery. Everybody guesses where the next terrorist strike would be. And it was an awful idea. It was such a nasty idea. And Ellen said, we're not gonna be part of it » : entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
[817] Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.
[818] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2, p. 28.
[819] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1998, Vol. 13, Number 2, p. 2.
[820] *Ibid*, p. 21.
[821] *Ibid.*, p. 28.
[822] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 25.
[823] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.

Weisbuch relate que « ça avait été dramatique pour certains »[824], car ils n'avaient pas encore ou plus de poste ailleurs. (Aujourd'hui, David Krakauer a une opinion différente, comme nous le dit Cris Moore : « The current culture as I've been told by David is that there is no upper bond if you are still very active and very productive »[825]). Une fois le départ des anciens, l'institut peut retourner graduellement à appointer des résidents, « une position rare »[826] et aussi ambitionnée du fait de la faible charge d'enseignement et de tâches bureaucratiques qu'elle demande par rapport aux postes universitaires[827] : c'est ce qui arrivera avec West, Luis Bettencourt, Jennifer Dunne, Krakauer, entre autres. Finalement, sous la présidence de Goldberg, le conseil d'administration prendra, parmi d'autres, les décisions suivantes : « Research professor positions – with terms of one to two years and renewable for an additional two to four years – be retained ; Senior resident professor positions be phased out »[828].
Pour en venir à l'histoire du rapport entre Langton et le SFI, une première synthèse nous la donne un interne du centre *off the record*, dont nous résumons ainsi la pensée :

> Langton était le plus intelligent de tous, et il n'avait que le Master, il n'avait pas de PhD. Ça lui produisait des problèmes de légitimité à Los Alamos. Lorsqu'il arrive au SFI, il s'attend d'être mieux accueilli. Mais au SFI il y a des gens du LANL aussi, et donc il retrouve le même problème, voire en plus grand. À cela s'ajoute la lutte entre egos des débuts du SFI, alors que Langton n'était pas du tout quelqu'un avec un grand ego. La jalousie s'installe. Au milieu des années 1990, le SFI semble sur le point d'imploser. Langton est ainsi forcé à partir[829].

Cette même personne nous relate que lors de la nécrologie consacrée à John Holland, Langton réapparaît en envoyant au comité éditorial de l'institut un poème dédié à son ex-superviseur. Tout en conduisant une vie en dehors de la recherche et tout en ayant empêché à ses destinataires de pouvoir lui répondre avec un système de blocage des mails, Langton semble donc suivre et regarder la vie du SFI de loin. Nous savons, en outre, que les conditions du départ ont représenté un autre point litigieux. Bien que le statut du Rio Grande Institute en 1984 lui permette d'acquérir ou vendre des brevets[830], la caractéristique non lucrative (non-profit) du nouveau statut du SFI oblige Langton à rendre *SWARM* accessible gratuitement en mai 1996[831]. Toutefois, lors de son départ, il demande à la direction de libérer le logiciel du cadre *open source*, pour pouvoir en faire un produit vendable et pour pouvoir ainsi en vivre[832]. Toutefois, cela lui est refusé pour des raisons légales et Langton sera contraint de partir sans une alternative ni académique ni privée. Certains nous ont dit qu'il se trouve quelque part près de San Francisco, où il construirait des canoës, tandis que d'autres nous ont dit qu'il est dans une ferme et que « c'est un cowboy maintenant »[833].
Avec le départ de Langton, sa création est presque disparue avec lui. La vie artificielle a donné une visibilité importante au SFI. Aujourd'hui, à part quelques membres externes qui continuent de s'en occuper pour leur compte, ce domaine de recherche n'a plus d'espace au sein de l'institut.

Conclusion

Les SSC dont le SFI se dit porteur apparaissent comme un domaine fondé de toutes pièces par une élite de physiciens américains, qui avaient pour premier objectif de faire

[824] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.
[825] Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.
[826] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 12.
[827] Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.
[828] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 24.
[829] Entretien avec anonyme.
[830] SFI, « Articles of Incorporation of Rio Grande Institute. May 22, 1984 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[831] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 19.
[832] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.
[833] Entretien avec Hugues Bersini, 25.05.16.

de l'interdisciplinarité à travers l'emploi de l'ordinateur et sans les contraintes des départements universitaires traditionnels. Après avoir rappelé brièvement le contenu des histoires indigènes ou « amies » du SFI, nous avons passé en revue tous les secteurs dans lesquels l'institut a construit son image et les moyens par lesquels il a disséminé son discours, pour fonder le nouveau domaine et l'inscrire dans le champ académique. On a vu que la labellisation des SSC comme purement computationnel dépend d'une contingence concernant les riverains du *Cowan Campus*. Tournons-nous maintenant vers l'Aparté 1, consacré à la question du projet politique que les *Senior Fellows* ont souhaité poursuivre en fondant le SFI.

Aparté 1 – Chapitre 4 – Pourquoi fonder le Santa Fe Institute et la « science de la complexité » ?

Introduction

Comment comprendre donc la fondation du SFI et de la « science de la complexité » ? Quels étaient notamment les objectifs des fondateurs ? Nous sommes partis de la tension repérable dans le discours du SFI entre la rhétorique de l'autonomie intellectuelle et le principe de réalité formé par le statut de centre privé financé par des privés. Cette tension se décline aussi entre l'ambition d'en faire un lieu de production théorique et la nécessité d'être attractif aux yeux des entreprises. La construction dès le départ d'une image de centre « indépendant »[834], insistait sur la liberté d'investigation et l'autonomie de pensée difficiles à trouver dans les universités. En même temps, il s'est progressivement défini comme « un institut de recherche théorique fondamentale »[835]. Pour Cowan, la qualité majeure de l'institut serait sa capacité de proposer « des idées fraîches, même outrageuses »[836]. Comment un centre de recherche détaché du système public, lié à des financements privés, peut revendiquer une démarche théorique ? Il s'agit d'un discours globalement à contre-tendance. Ce chapitre examine les éléments de réponse à la question sur les objectifs des fondateurs du SFI tout en contribuant au débat autour du « néolibéralisme » dans l'université et la recherche[837]. Le projet politique des fondateurs du SFI est ainsi saisi à travers la description de cette institution, tout en permettant de dire quelque chose de plus général sur le monde académique américaine. Nous sera utile le concept de *régime de production de connaissances*, caractérisé par Dominique Pestre en 2003[838] pour périodiser l'histoire de sciences en différentes phases, ancrées dans des formes d'existence sociales. Ceux-ci se composent d'un certain nombre d'éléments :

> « des productions de tous ordres (écrits, résultats, techniques) ; des pratiques (instrumentales, calculatoires, de simulation) ; des valeurs et des normes (épistémologiques, morales, comportementales) ; des réalités institutionnelles

[834] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 0.
[835] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 48.
[836] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 2.
[837] Rhoades, G. & Slaughter, S., « Academic Capitalism in the New Economy. Challenges and Choices », *American Academic*, 2004, vol. 1, n. 1, pp. 37-60 ; Bruno, I., Clément, P. & Laval, C., *La grande mutation. Néolibéralisme et éducation en Europe*, Paris, Éditions Syllepse, 2010 ; Barrier, J., « La science en projets, financements sur projet, autonomie professionnelle et transformations du travail des chercheurs académiques », *Sociologie du travail*, 2011, n. 53, pp. 515–536 ; Lorenz, C., « If You're So Smart, Why Are You under Surveillance? Universities, Neoliberalism, and New Public Management », *Critical Inquiry*, 2012, n. 38, pp. 599-629 ; Busch, L., *Le marché aux connaissances. Néolibéralisme, enseignement et recherche*, Versailles, Quæ, 2014.
[838] Pestre, D. *Science, argent et politique*, Versailles, Quæ, 2003.

variées (laboratoires, 'start-ups', écoles d'ingénieurs) ; des modes d'insertion politique et de sociabilités (salons, groupes d'amateurs, sociétés professionnelles) ; des réalités économiques et juridiques (modes d'appropriation, financements, règles de propriété industrielle) »[839].

Toute période historique se caractérise par l'hégémonie d'une articulation particulière de ces éléments, une articulation basée sur des formes de compromis social, de production pratique et de management politique, dans une perspective qui n'ignore pas les interdépendances et les « effets systémiques »[840]. L'idée de système, si elle est uniquement métaphorique comme dans ce cas, n'implique pas que toute chose qui existe à une époque donnée fonctionne de manière égale à toute autre. Avec le SFI, les formes que peut prendre un même régime sont variables. Pestre décrit un certain nombre de changements depuis les années 1980, dont certains, parmi d'autres, sont les suivants : la *cité par projet* définie par Luc Boltanski et Ève Chiapello[841] a gagné du terrain (de manière variable selon les pays) dans plusieurs domaines de la société ; l'État a perdu sa centralité dans la production et dans la gestion des technosciences ; la recherche fondamentale a reculé et les activités de recherche sont de plus en plus liées aux impératifs du marché et à la production industrielle ; la course au dépôt de brevets suit une courbe exponentielle. Or, si le SFI revendique une science fondamentale ; si celle-ci est peu reliée au monde de la production industrielle (il existe tout de même quelques exemples d'optimisation de chaînes de production en usine par des outils forgés au SFI) ; si les brevets y sont interdits, puisque l'institut est un organisme non-lucratif (ce qui encourage les grandes fortunes à faire des donations, grâce au « *tax break* » dont ils peuvent bénéficier[842]), ce n'est pas pour autant que l'esprit de l'institut et de ses fondateurs ne s'inscrit pas dans le *régime de production des connaissances* actuel, souvent qualifié de « néolibéral ».

L'histoire des *voies de légitimation* par lesquelles les SSC se sont construites se poursuit donc avec la description du mode de fonctionnement institutionnel du SFI du point de vue organisationnel, argumentatif et économico-politique. Ici nous restituerons son mode de fonctionnement tel que nous avons pu l'observer en « jouant l'étranger » – opération d'autant plus facile que nous provenons d'un système académique différent. Par cette enquête, nous revenons également sur la thèse de la *convergence asymétrique* proposée par la sociologue Kelly Moore et par ses collègues[843]. Déjà Pestre proposait de distinguer entre un *régime de production des savoirs* qui combine deux systèmes en équilibre relatif – une science ouverte et publique, et une science privée –, et un « régime qui cherche à faire du premier le seul

[839] *Ibid.*, p. 34.
[840] *Ibid.*, p. 36.
[841] Boltanski, L. & Chiapello, È., *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris, Gallimard, 1999.
[842] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.
[843] Moore, K., Kleinman, D.L., Hess, D. & Frickel, S., « Science and neoliberal globalization : a political sociological approach », *Theory and Society*, vol. 40, n. 5, pp. 505-532.

servant du second »[844]. Moore et ses collègues précisent cette relation inégale entre monde de l'université et de la recherche d'une part, et monde industriel et financier d'autre part, en parlant de *convergence asymétrique* :

> « As some areas of university R&D become commercialized and subject to an entrepreneurial ethic, the codes and practices of academia were simultaneously finding their way into industry […] We term this double transformation *asymmetric convergence* […] high-technology industry increasingly offered benefits once characteristic of university settings, even as universities became subject to the managerial practices associated with the corporate world. This convergence is asymmetrical because in many instances industry maintains an economic and (increasingly) cultural advantage »[845].

Thèses et structure du chapitre

Derrière la tension entre l'image de centre théorique et celle de centre utile à la société, l'on retrouve la manifestation d'un *travail de démarcation* qui, comme souvent dans les technosciences, entretient un double discours selon qui l'on a à faire : d'un côté, dans l'espace médiatique, le SFI défend son intérêt pour la théorie et son indépendance intellectuelle ; d'un autre côté, dans la gestion interne et dans le rapport avec les financeurs, il met en avant l'utilité et les possibles « applications » de ses recherches. La première thèse que nous défendons ici est la suivante : plus que de *convergence asymétrique*, il s'agit d'une *coïncidence idéologique* entre le monde de l'entreprise et le SFI, telle qu'elle se présente dans la forme institutionnelle de l'institut (organisé comme une firme), dans la forme de l'organisation du travail scientifique (sur projet et interdisciplinaire, avec un échange entre scientifiques et manageurs) et dans les résultats scientifiques (porteurs d'objectifs de « croissance », de « gain », d'« innovation » et de « compétitivité » – tous des termes indigènes). En transformant le SFI en une firme, les fondateurs ont annulé, sous plusieurs aspects, toute frontière entre monde de la recherche et monde de l'entreprise. De l'autre côté, le SFI a pu cadrer son discours officiel sur un registre à contre-courant du discours hégémonique des technosciences, se décrivant comme utiles pour la société.

La deuxième thèse que nous défendons, qui répond à la première question sur les buts réels des fondateurs de la « science de la complexité », est la suivante : le groupe d'élite des *Senior Fellows* du LANL, qui se perçoit et décrit comme un groupe d'Hommes de la Renaissance, décide d'employer un certain nombre d'outils, théoriques et techniques, liés notamment à l'usage de l'ordinateur, pour faire face aux vieux et nouveaux problèmes qui se présentent à l'ère du néolibéralisme. On est en 1984, Ronald Reagan est le Président des États-Unis depuis trois ans ; les fondateurs

[844] Pestre, D. *Science, argent et politique*, *op. cit.*, p. 115.
[845] Moore, K., *et al.*, « Science and neoliberal globalization », *op. cit.*, p. 513.

du SFI se retrouvent face à un nouveau monde, en tout cas à une nouvelle configuration économico-politique. À partir de leurs connaissances théoriques, techniques, sociales et politiques, ils pensent pouvoir devenir les pionniers d'un nouveau mode de faire science pour résoudre les problèmes géopolitiques, industriels, financiers, environnementaux et médicaux du contexte dans lequel ils vivent. Maîtrisant le savoir qui, d'après eux, a permis les plus grandes avancées à l'humanité (à savoir, la physique) ; maîtrisant un outil très puissant (l'ordinateur) ; connaissant les vertus du travail scientifique interdisciplinaire (connu et mis en place pendant la Seconde Guerre) ; et possédant un carnet d'adresses de scientifiques prestigieux, d'entrepreneurs et de magnats, aussi bien que d'hommes politiques, les *Senior Fellows* s'auto-investissent ainsi d'une mission sociale multidimensionnelle : face à la croissante libéralisation du monde, ils proposent une *mathesis universalis* pour aborder tous les domaines de la société.

Quatre sous-sections composent cet Aparté 1. La première revient sur des aspects institutionnels et organisationnels que nous n'avons pas traités précédemment, tels que l'histoire des bâtiments, le choix de la ville de Santa Fe et l'organisation interne de l'institut. La deuxième analyse l'économie des promesses[846], à la fois épistémiques et politico-économiques, que le SFI a brandi pour caractériser son identité, son rôle et pour attirer un certain type de financements. La troisième revient spécifiquement sur les exemples concrets d'« applications » des sciences de la complexité aux problèmes du « monde réel », expressions qui sont très souvent employées par les membres du SFI et par ses financeurs. La quatrième décrit enfin le fonctionnement général du SFI comme une entreprise privée et nous permet de revenir sur la question du *régime de production des connaissances* et de la *convergence asymétrique*, ainsi que sur celle du projet politique des *Senior Fellows*.

Structure et organisation institutionnelles

En 1984, les ambitions des *Senior Fellows* sont démesurées : collecter – si possible rapidement, afin de rassurer les futurs membres de l'institut du sérieux du projet – 230 millions de dollars, dont 80 pour quarante chaires, 60 pour embaucher cent jeunes chercheurs, 20 pour le laboratoire, les bureaux et les salles de cours, et le reste pour d'autres nécessités de fonctionnement[847]. Les aspirations sont donc celles de fonder un centre comparable aux instituts les plus prestigieux du pays : « Either the Rio Grande Institute will be a new scientific institution of historic importance and dimensions, or it will not be »[848]. Dans cette phase les débats portent sur les sources d'inspiration :

[846] Joly, P.-B., « On the economics of techno-scientific promises », *op. cit.*
[847] SFI, « The Aims of the Rio Grande Institute. Draft 5/30/84 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
[848] SFI, « Discussion Paper Concerning the Conception, Creation and Operation of the Rio Grande Institute. May 15, 1984 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».

l'Institute for Advanced Studies de Princeton est vu comme un modèle négatif (il n'y aurait pas assez d'interdisciplinarité), tandis que l'Aspen Institute et l'Institute for Scientific Interchange à Turin sont décrits comme des modèles positifs (bon dialogue entre disciplines et résidences courtes)[849]. Cowan relate avoir visité « le Salk Institute et l'Université Rockefeller pour chercher leurs statuts et les utiliser comme modèles pour les nôtres »[850].

Les déménagements

Assez vite, les fondateurs reverront leurs ambitions à la baisse, puisque l'institut ne dépassera jamais un budget un peu supérieur à la douzaine de millions de dollars par an. En revanche, le plan inclut dès le début tous les éléments qui feront plus tard partie du *Cowan Campus* à Hyde Park Road, exception faite pour les laboratoires de sciences naturelles. C'est-à-dire un édifice central pour les besoins des chercheurs et des chercheuses, des édifices pour le staff et des infrastructures informatiques. Le budget nécessaire prévu était d'un million de dollars[851]. Le chrono-programme visait à l'occuper en 1988[852]. Le chiffre nécessaire n'est pas atteint et la direction se tourne, temporairement, vers le couvent de l'Église de Cristo Rey situé au 1120 de Canyon Road[853]. En 1990, le bail du couvent arrive à terme et le SFI est mis à la porte – officiellement pour la nécessité de récupérer de l'espace, en réalité pour mettre à la porte des locataires trop bruyants et indiscrets aux yeux du voisinage : « The Catholics didn't like all those cars. There was a parking problem. That area is touristy, quiet and charming. And we're not exactly quiet and charming »[854]. Le SFI vise ainsi à déménager dans un campus permanent au plus tard à la fin de 1991[855]. L'objectif reste ambitieux : 10 millions de dollars[856]. En attendant, l'institut loue des bureaux au 1850 Old Pecos Trail pendant le temps nécessaire à l'achat et à la préparation d'un campus stable[857]. Les années passées dans cet endroit ne sont pas vécues ni rappelées avec plaisir ni par les scientifiques ni par le staff[858]. Le campus ne sera acheté qu'en 1992, par le biais d'une donation consistante de la part de Cowan, devenu riche grâce à sa place à l'intérieur de la Los Alamos National Bank[859]. Dans le bulletin de l'automne 1993, le SFI annonce le déménagement dans le lieu actuel :

---

[849] Williams, L., *Modeling, Building, Writing*, *op. cit.*, p. 132.
[850] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 146.
[851] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, p. 6.
[852] *Ibid.*, p. 7.
[853] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 2.
[854] Entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
[855] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 3.
[856] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 20.
[857] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 18.
[858] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 23.
[859] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, pp. 80-81 ; https://www.lanb.com/docs/default-source/TCC/Proxy/2007proxy.pdf.

« By the end of the year, and perhaps sooner, Santa Fe Institute expects to move to its new, and permanent, home. We have purchased the 32-acre site known locally as the Hurley Estate, after General Patrick Hurley, who built the 12,000-square-foot house on a hill in northeast Santa Fe for his family in the late 1950s »[860].

Dans la foulée, une mention est faite de l'opposition que le voisinage manifeste contre le changement de destination de la résidence pour la transformer en laboratoire scientifique. L'institut remercie les citoyens et citoyennes qui ont manifesté de plusieurs façons leur support à l'institut, afin de convaincre le futur voisinage du SFI, ainsi que le conseil de la ville, que le « SFI ne serait pas seulement un bon voisin, mais qu'il serait un atout important pour la communauté »[861]. En outre, l'institut adoptera une attitude respectueuse de l'environnement, qui s'intensifie en 2010, lorsqu'il lance un « programme vert », consistant dans l'usage de tasses, verres et assiettes lavables, au lieu de celles jetables, ainsi que dans l'usage de moins d'eau et de papier, qui est maintenant recyclé[862]. Le déménagement au 1399 Hyde Park Road ne se fera qu'en juillet 1994 : les bâtiments existants auront été rénovés, mais les « pods » (capsules pour entendre étages) ne seront pas encore construits[863].

Quel statut pour le SFI ?

Toutes les archives montrent que, d'après la direction du SFI, une certaine hésitation s'est longtemps affirmée autour du statut académique du centre. Les dirigeants n'arrivaient pas à trouver un consensus sur le fait de le transformer en une université, avec des professeurs permanents et des étudiants de premier cycle, ou bien conserver ce qu'il a toujours été, à savoir une *visiting institution*[864]. Cowan explique en 2004 que l'impératif de ne pas avoir de départements était plus fort que la volonté de devenir une véritable université : « Murray Gell-Mann had been fettered by a system focused on departments, and so insisted there be none. The group discussed becoming a fully accredited graduate school, but realized that without departments it would be hard to give Ph.D. degrees »[865]. En réalité, sur ce point le SFI a oscillé à plusieurs reprises : selon les moments et les contextes historiques, le *travail de démarcation* qu'il a mené l'a porté à mettre en évidence un aspect plutôt qu'un autre en fonction de qui était son interlocuteur. L'institut a parfois déclaré souhaiter devenir une université dans le long-terme, comme l'atteste le premier *by-laws* du Rio Grande Institute[866] ; ce statut mettait en avant le caractère d'établissement pédagogique pour demander une exonération

[860] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 2.
[861] *Ibid.*
[862] Entretien avec John German, 23.09.16.
[863] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 0.
[864] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 1.
[865] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 11-12.
[866] SFI, « Bylaws of the Santa Fe Institute. Santa Fe, New Mexico. As amended on November 3, 2013 », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».

fiscale sur les impôts sur la propriété[867] ; en revanche, l'institut s'est retrouvé à devoir minimiser son caractère pédagogique lorsqu'il fut accusé d'être une entreprise qui vend ses recherches, un *think tank* payé par le gouvernement, voire une université privée[868]. Finalement la négociation entre l'avocat civil du SFI et la mairie, finalisée avec l'obtention de l'exonération fiscale, aboutit à l'inscription dans la catégorie « club privé »[869]. Mais la porte fut laissée ouverte : « While at present, SFI is not an assemblage of colleges or departments, it could, depending upon its future evolution, satisfy the definition of 'university' under certain conditions »[870] (Erica Jen ouvre encore à cette hypothèse dans un entretien reporté dans le bulletin de l'hiver 1996-1997[871]).

L'absence de départements

Si les archives montrent combien les raisons des choix institutionnels sont fortement dépendants de causes de nature politique et économique (devenir une vraie école privée aurait impliqué payer plus d'impôts), ce qui n'a jamais changé, ni dans la tête des fondateurs, ni dans les statuts, ni dans l'organisation effective du SFI, c'est le refus d'avoir des départements. Une des questions posées lors des rencontres fondatrices était la suivante : « What are some leading examples of promising new fields of research, study and PhD education which do not fit well within existing 'fields' or 'sub-fields' ? »[872]. Mike Simmons, qui d'une part tissait l'éloge du LANL pour ses recherches interdisciplinaires à succès, se lamentait en même temps de sa bureaucratie liée aux séparations disciplinaires. Il repérait donc, dans la petitesse et dans la flexibilité du SFI, un atout indispensable pour que l'institution puisse s'adapter rapidement aux changements dans le panorama scientifique[873]. Comme on le lit dans le

---

[867] SFI, « Santa Fe Institute of Science – Protest for Denial of Exemption from Property Taxes for Santa Fe Institute. Rubin, Katz, Salazar, Alley & Rouse. A Professional Corporation. Attorneys at Law », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus » ; SFI, « City of Santa Fe, New Mexico. Memo. April 12, 1993. To : Ed Romero, Zoning Division Director. From : Gerald Gonzalez, City Attorney », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

[868] « SFI does not engage in contract research nor does it conduct research for profit or sell research to the United States or to any other person or entity. […] Contrary to the allegations of appellants, SFI does not have contract researchers, and its research participants do not do contact research for pay at the Institute. […] SFI does not sell research publications. […] There is no permanent or regular faculty, as is found at a private school, college or university. […] SFI does not have regularly enrolled students. […] and the Institute does not confer degrees » : SFI, « Santa Fe Institute – Special Exception Appeal. Rubin, Katz, Salazar, Alley & Rouse. A Professional Corporation. Attorneys at Law. Affidavit of Bruce R. Abell », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

[869] SFI, « City Oks Institute's Hyde Park Relocation. Michelle Melendez », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

[870] SFI, « City of Santa Fe, New Mexico. Memo. April 12, 1993. To : Ed Romero, Zoning Division Director. From : Gerald Gonzalez, City Attorney », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

[871] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 11.

[872] SFI, « Discussion Paper Concerning the Conception, Creation and Operation of the Rio Grande Institute. May 15, 1984 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».

[873] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 9.

bulletin de 1988, les financements pour les programmes de recherche ont pour fonction d'aller « vers l'achèvement de notre vision d'une institution libre des barrières artificielles définies par les disciplines traditionnelles et par les limitations programmatiques »[874]. Lorsque Simmons, avant de devenir l'une des premières chevilles ouvrières du SFI, est approché par Cowan et Metropolis pour être enrôlé dans le projet du nouvel institut, les deux *Senior Fellows* mettent en premier plan le côté multidisciplinaire de l'institution et l'absence des barrières entre disciplines[875]. Ils cherchent à créer les conditions d'une liberté, d'une fluidité et d'un dynamisme qui, selon eux, n'existent nulle part ailleurs : « [At SFI] there are no departments, no positions, no permanent research staff, no day-to-day responsibilities for researchers beyond trying out embryonic interests and following them up »[876]. Le souci de tous les présidents a toujours été celui d'assurer le renouvellement constant du corps professoral, afin de garantir l'innovation scientifique : « We must continue to expand our horizons to include visitors with different points of view and those who have expertise in disciplines not presently resident at SFI »[877]. John Holland – qui est physicien, mathématicien et informaticien de formation, et professeur de psychologie, d'électronique et d'informatique – regrette le fait que les universités échouent à rendre possible l'interaction entre disciplines[878]. Son appui à toute l'entreprise du SFI est donc net : « What you really need is a group of people who know several disciplines and are good at getting ideas, people who can let their minds roam and are willing to suspend disbelief for awhile »[879].

Non seulement le SFI se veut un centre de recherche sans divisions disciplinaires, mais se définit aussi comme une *visiting institution*. Un peu plus tard paraît aussi l'expression « institution sans murs » : « SFI might best be described as a growing, extended family whose members stay in touch by phone and computer and who return frequently to sit around the table at SFI »[880]. Le centre entend par là le fait que la plupart de son corps professoral passe la plupart de son temps de recherche ailleurs qu'à Santa Fe : « Research on particular themes or trajectories is carried out not only at our campus hub in Santa Fe but also in many dispersed locations. At any one time more than 100 resident and non-resident scientists are at work on SFI projects »[881].

Dans un tel contexte, la collecte des données, quelle que soit sa forme, apparaît problématique faute de résidents ou de grosses infrastructures *in situ*, à part des ordinateurs. Dans l'appel à candidature pour le postdoctorat de l'hiver 1996-1997, le SFI souligne par conséquent que le profil idéal est celui de jeunes chercheurs et

[874] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 3.
[875] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 8.
[876] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 6.
[877] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 1.
[878] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1, p. 11.
[879] *Ibid.*
[880] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 28.
[881] SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 2.

chercheuses qui seront capables de conduire une recherche expérimentale au sein d'une autre institution, éventuellement dotée de l'instrumentation nécessaire[882].

Think tank ou pas ?

Il est intéressant de remarquer le rapport difficile que l'institut a toujours entretenu avec la définition de *think tank* : « There was universal agreement, explique Cowan dans ses mémoires, that we would not be a think tank that provided legislative options to policy makers. The think tank might come later with a separate building and staff »[883]. Par contre en 2011, le rapport annuel vante une position importante dans une classification de l'Université de Pennsylvanie classant les *think tank* de science et technologie du pays[884]. Mais c'est surtout sous la présidence de David Krakauer, débutée en 2015[885], qu'une véritable transformation de l'institut semble avoir été entamée. L'institut refuse toujours la dénomination de *think tank* : « we're not a think tank. We're not a policy institute at all and that's a very hard line here »[886]. Toutefois, de par leurs dispositifs de financement par les entreprises et par les agences gouvernementales ou non-gouvernementales, l'institut fait de plus en plus un travail de conseil. Cela, tout en excluant de se faire dicter une direction de recherche par les financeurs ou en refusant la mise en place de contrats de développement. Comme nous l'a dit la responsable de la collecte des fonds auprès des particuliers : « we don't do policy but we share our scientific work [that can] inform policy decision [taken] by others. But it's sort of further up river from policy. […] it must come before good policy can happen »[887]. Elle nous a raconté aussi que la Bill & Melinda Gates Foundation a récemment contacté le SFI pour analyser des données internes. Contacter un *think tank* aurait signifié, pour la Fondation, recevoir des analyses « biaisées » par leur agenda politique :

> « [Our contact from the Gates Foundation] explained that if they gave that data to an institute or a policy… they all have political agendas and SFI has no political agenda and also is not selling policy. So she felt like it was only SFI that could

[882] « Special consideration will be given to those applicants who propose, as an integral part of their research at SFI, a project involving experimental work or data collection at locations other than SFI » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 1.
[883] Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute*, *op. cit.*, p. 146.
[884] SFI, *Santa Fe Institute 2011 Annual Report*, 2011, p. 17.
[885] David Krakauer arrive au SFI en 2003. Voice brièvement son parcours : « young lecturer at Oxford, theoretical biologist and Santa Fe Institute Resident Faculty member […] What drives Krakauer as a biologist is the infinite problem of how and why cells communicate, how they organize, transmit information, and select and make decisions. […] He did his doctorate in game theory and cognition and then started building models on the propagation of infectious diseases » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 11. Il devient ensuite *Chair of Faculty* en 2009 : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 1.
[886] Entretien avec Laura Steward, 23.09.16.
[887] *Ibid.*

> really tell them the truth about this data and the capital T truth and that's not a word you get to use much »[888].

Tout en acceptant d'être vu comme le dépositaire d'une Vérité avec un « v » majuscule, le SFI nous paraît se constituer de plus en plus comme un *think tank* de l'« ombre » : le travail de conseil n'est pas formalisé, la recherche n'est pas dictée par les financeurs et ces derniers ne peuvent pas engager les scientifiques de l'institut par le biais d'un contrat. L'autonomie est ainsi formellement gardée, mais des « applications » existent, la problématique de l'utilité des connaissances produites se pose et, surtout, il existe des affinités électives entre la recherche produite au SFI et la vision du monde de ses financeurs, lesquelles ont une influence visible dans la *co-production* des connaissances des scientifiques de l'institut[889].

Pourquoi la ville de Santa Fe ?

Une question que l'on se pose souvent concerne le choix de Santa Fe pour installer un tel centre. La première raison est la convenance stratégique en raison de la géographie des États-Unis ; entre la côté ouest et le Midwest, il y a un vide à remplir :

> « there's no real academic center of scientific excellence between, say, Chicago, Urbana, and Madison in the Midwest and the West Coast. With Los Alamos, a major interdisciplinary scientific laboratory, nearby, establishing a major new scientific institution in Santa Fe seems to be both timely and desirable »[890].

Un lieu périphérique est, par ailleurs, un lieu qui a moins de concurrents voisins, ce qui peut le faire remarquer plus facilement. Ensuite, la géographie joue encore une fois un rôle, lorsque Simmons compare le SFI à l'Aspen Center for Physics du Colorado, un lieu retiré, car « tous les deux cherchent à pourvoir une atmosphère libre des distractions des institutions de rattachement où les chercheurs peuvent se concentrer pour travailler à leurs idées »[891]. La beauté des paysages sera aussi ajoutée aux raisons qui ont motivé le choix : « Santa Fe is a wonderful destination. It makes part of the romantic cachet of SFI »[892] ; Cowan définit la ville comme un « aimant »[893]. Puis l'intérêt stratégique en termes de ressources humaines, computationnelles et infrastructurelles : des doctorants et des scientifiques du LANL feront partie du SFI ; certains ordinateurs seront prêtés par le LANL au SFI ; et des membres du SFI organiseront des conférences dans les salles du laboratoire. Nous rappelons que Los

[888] *Ibid.*
[889] Jasanoff, S., (ed.), *States of Knowledge. The co-production of science and social order*, London, New York, Routledge, 2004.
[890] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 22.
[891] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 9.
[892] Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[893] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, p. 8.

Alamos est à une heure de voiture de Santa Fe. À toutes ces raisons, il faut ajouter le fait que certains des *Senior Fellows*, au moment de la fondation de l'institut, habitaient déjà dans cette aire géographique.

Comment définir le SFI ?

Qu'est-ce qu'en définitive le SFI ? Pour donner une image synthétique de l'institut, nous dirons qu'il s'agit d'une plateforme, physiquement réduite mais plus imposante en termes de personnes, qui a fait fonction de « catalyseur » de recherches[894], en permettant la rencontre entre scientifiques qui ont parfois lancé des nouveaux domaines de recherches. Si le corps professoral oscille, selon les années, entre quelques dizaines et plus d'une centaine d'affiliés, la vie de l'institut est variable aussi. Des périodes de calme, où l'on y retrouve seulement quelques résidents (de longue durée et temporaires), s'alternent à des périodes où plusieurs dizaines d'affiliés s'y retrouvent en même temps, en particulier à l'occasion des vingt workshops annuels. L'*Annual Report* de 2007 fournit une bonne synthèse de ces variations :

> « At any one time there are between 20 and 50 researchers in residence. Scientists in residence include faculty, postdoctoral fellows, graduate students, corporate affiliates, and visiting researchers. Resident Professors' appointments are from one to five years, and in some cases longer. Postdoctoral Fellows are at SFI from one to three years. Graduate students hold fellowships at the Institute for up to one year under the guidance of senior scientists. Visiting scientists from other institutions come for periods of a few days to year-long sabbatical visits »[895].

D'un point de vue épistémique, quoiqu'il revendique être le lanceur des SSC, l'institut ne veut pas se voir réduit à cela. En 2013, la vice-présidente Jennifer Dunne se réjouit, au nom de l'institut, de l'influence qu'il a exercé sur les autres centres de la complexité qui sont apparus dans le monde en s'inspirant du centre américain, mais rajoute vite que la portée du SFI se veut plus vaste, ouverte et innovante :

> « Recently, in thinking about the first 30 years of SFI's history, the Institute's role, and its impact on science, I searched the web for groups, programs, and centers that have 'complexity' or 'complex systems' as a focus. In just a few minutes of searching, I came up with more than 60 programs, just a fraction of what is out there. If imitation is the sincerest form of flattery, SFI clearly has had a major impact on the scientific enterprise and its jargon. However, I also noted that the vast

[894] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 0.
[895] SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 42.

majority of those programs are university-based and quite narrowly focused compared to SFI's scope »[896].

Nous avons vu plus haut que le souci de l'innovation social et théorique a représenté la première préoccupation de toute présidence du SFI. C'est dans cette clé que l'extrait de Dunne doit être lu. Toutefois la description de l'institut serait incomplète, si l'on ne prenait pas en compte le volet de l'économie des promesses et celui du rapport avec le contexte économico-politique plus général – qui conclura cet Aparté 1.

Les promesses épistémiques

Comme l'écrit le sociologue Pierre-Benoît Joly, on peut parler d'*économie* des promesses technoscientifiques parce que, dans les discours promettants des scientifiques entrepreneurs, il n'y a pas que des discours : « in such regimes, promises are not just a matter of discourses and representations. They also involve practices of exploration and experimentation ; they are related to investment, and to mobilization, circulation, and accumulation of resources »[897]. Cette sous-section et la suivante abordent les promesses du SFI non pas seulement avec une attention aux discours en tant que tels, mais parce qu'ils sont liés à des conditions matérielles et sociales importantes pour comprendre la démarche de l'institut : « [t]echno-scientific promises […] also have a material dimension, for they foster new alliances and orientate entities (humans and non-humans) towards a given project »[898]. À travers la mise en place de processus hétérogènes pour gagner en crédibilité et en légitimité, les entrepreneurs scientifiques d'un nouveau domaine technoscientifique doivent dépasser le seul domaine académique pour exister : « promises have to be credible for various actors, namely : government labs, government agencies, private companies, and venture capital firms. They also have to pass the test of public opinion »[899]. Tout cela est vrai pour les nanotechnologies ou les biotechnologies, qui se veulent industrielles d'emblée ; mais en réalité cela concerne également les SSC, bien qu'elles se présentent plus comme un domaine théorique. « Théorie » et « application » ont des frontières floues dans tous ces domaines, car les nanotechnologies et les biotechnologies nécessitent de la recherche fondamentale avant de produire des artefacts ; tandis que les SSC produisent des théories et des modèles qui sont souvent employés dans d'autres domaines scientifiques, techniques et politiques : il suffit de penser à la théorie des réseaux, désormais couramment appliquée dans l'industrie ou dans la gestion des affaires publiques.

[896] SFI, *Santa Fe Institute 2013 Annual Report*, 2013, p. 2.
[897] Joly, P.-B., « On the economics of techno-scientific promises », *op. cit.*, p. 204.
[898] *Ibid.*, p. 205.
[899] *Ibid.*, p. 208.

La tendance unificatrice des Senior Fellows

Dans un entretien de 1989, David Pines définit la mission générale du SFI comme étant celle d'une « Institution qui jouera un rôle majeur dans la définition de l'agenda scientifique et éducative du XXI[ème] siècle »[900]. En 1994, John Casti déclare ceci :

> « Science, Santa Fe-style, with its emphasis on decentralized, transdisciplinary investigations and bottom-up computer simulations of complex, adaptive systems, offers the best possible preview I can envision of what scientists will be doing – and how they'll be doing it – in the 21st century »[901].

De telles déclarations ne sont pas des cas isolés, les exemples étant bien plus nombreux, y compris en Europe. Cette tendance au « *hype* » sera critiquée au début des années 1990 par des journalistes et des scientifiques externes au SFI. En raison de cela, un réaménagement de la direction, du discours officiel de l'institut, du corps professoral et des recherches menées se produit donc avec l'élection de la microbiologiste Ellen Goldberg en 1996 (voir infra). Ici nous allons parcourir d'abord l'histoire des promesses épistémiques du SFI, qui constituent le principe structurant de son identité vis-à-vis de la communauté scientifique.

Tout au long de l'histoire du centre de recherche du Nouveau-Mexique, l'étude interdisciplinaire des systèmes complexes a été conçue comme un moyen pour parvenir à une ou à plusieurs théories générales, capables de rassembler, sous un même « toit » mathématique et conceptuel, des objets d'étude de nature différente : « We believe, écrit John Holland, that there *are* general principles that will deepen our understanding of *all* complex adaptive systems »[902]. Cependant, il y a eu deux grandes phases de cette *tendance* que, par simplicité, nous appellerons *unificatrice* : dans la première phase de l'histoire de l'institut, celle dominée par les *Senior Fellows*, la théorie générale recherchée se veut de tous les systèmes complexes, indépendamment des disciplines et des ontologies spécifiques[903], cela selon le principe énoncé par Gell-Mann de l'étude de la « complexité de surface qui surgit d'une simplicité profonde »[904] ; sous la présidence de Goldberg, l'institut et la plupart de ses membres abandonnent cet objectif, controversé, et commence à s'affirmer une démarche, qui trouvera son plus grand soutien en Geoffrey West et qui visera à trouver des théories générales « locales », c'est-à-dire au niveau d'une discipline ou au niveau d'un concept transversal à plusieurs disciplines. Avant de parler de cette version de la *tendance unificatrice*, abordons le rêve des fondateurs. Dans ce cas, il s'agit de créer

[900] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 21.
[901] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 33.
[902] Holland, J.H., *Hidden Order*, *op. cit.*
[903] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 6.
[904] Pines, D. (ed.), *Emerging Syntheses in Science*, *op. cit.*, p. 3.

un cadre théorique commun aux systèmes complexes naturels et humains. Comme le dit Marcus Feldman dans le premier bulletin du SFI en 1986, ce qui motiverait une telle mission épistémique serait le fait que tous ces phénomènes partagent un cadre mathématique commun[905]. Un workshop intégratif autour des « thèmes sous-jacents à la complexité et à l'adaptation qui sont communs à plusieurs activités de l'Institut » est organisé au SFI en février 1989[906]. En 1990, Doyne Farmer soutiendra, dans un entretien, que les différents outils développés ou employés par les membres du SFI, et en dehors, ne font que décrire les mêmes phénomènes avec des langages différents[907], en supposant ainsi une homologie formelle qui serait susceptible d'unifier ces différentes approches. Est bien connu le rêve que nombre de physiciens ont par rapport à la possibilité de trouver une « théorie de tout », qui unifie les quatre lois fondamentales qui régissent l'univers et qui unit la physique du macroscopique à la physique quantique. Si ce même rêve est fort évident dans la volonté des fondateurs et premiers membres de l'institut de fonder une théorie de tous les systèmes complexes, elle n'est pas moins manifeste dans la deuxième forme de *tendance unificatrice* qui commence avec l'ère Goldberg et persiste aujourd'hui.

La tendance unificatrice de Goldberg et West

L'arrivée de la microbiologiste à la présidence du SFI et de la mathématicienne Erica Jen à la tête des affaires académiques marque le début d'une nouvelle phase pour l'institut. Par exemple, dans un article signé par Jen paru sur le bulletin de l'hiver 1996-1997, la chercheuse explique qu'il est nécessaire que le SFI garde son pouvoir d'innovation, en accueillant « des manières de penser même 'friables' », mais qu'il doit aussi faire attention « aux données empiriques et expérimentales »[908]. C'est un souci de solidité scientifique, après le déferlement critique de l'article de John Horgan, *From Complexity to Perplexity*[909] : « we also have to make sure we're doing the kind of science that solves problems »[910], ajoute Jen[911]. Horgan, dans son article, critiquait l'excès de *hype*, l'attitude évangélique de certains membres de l'institut et le surcroit de crédit que l'on y donne aux simulations numériques. La force de son article résidait dans le fait que, pour fonder ses remarques, il citait des membres du SFI lui-même

[905] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1, pp. 8-9.
[906] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 16.
[907] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 23.
[908] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 8.
[909] Horgan, J., « From complexity to perplexity », *op. cit.*
[910] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 8.
[911] Mitchell Waldrop sur Horgan a une analyse intéressante : « I don't think [Horgan] was particularly fair. His critique had a point to the extent that there were some people, not so much the SFI scientists, but some people, who were hyping complexity or embracing it uncritically. I suppose you could accuse my book of doing that. In retrospect maybe it was. Sometimes when people called me, I was a little horrified how they would take it as a religious revelation. I would say, 'Wait a minute, it's not that. It's a way of thinking, intriguing ideas, it's just the beginning, etc.'. Horgan saw that, which was a real concern, and accused the entire complexity community of doing that. However there was enough truth to it that I know that the folks at Santa Fe said, 'Hey, we gotta quit talking of the generalities, we gotta get down to work and make this stuff work, make it a science' » : entretien avec Mitchell Waldrop, 02.12.16.

(Jack Cowan, Jim Crutchfield), ou des proches (John Maynard Smith). En réaction à cela, Jen est explicite : « Ellen and I, as new members of the administration, will certainly be making changes »[912]. L'apport de la biologie, à travers Goldberg, et des mathématiques, à travers Jen, sont les changements principaux. Dans le bulletin de l'été 1997, Jen reconnaît que le SFI est l'un des rares centres qui génèrent autant d'« attention » que de « controverses »[913]. Elle rappelle que l'institut est tout à la fois « connu de tout le monde pour être interdisciplinaire » et « friable ». Un physicien statistique allemand nous explique que cette « réputation » perdure à l'heure actuelle : « Santa Fe has a little bit of that reputation […] you make broad claims, but you don't really back them up, or that the work is sort of superficial »[914]. Dans ce contexte, en 1998, Jen qualifiera l'objectif d'une théorie générale des CAS comme l'un des moins modestes[915]. Peu après, le bulletin cite une phrase du biologiste Aaron Katchalsky, qui résulte comme une flèche dirigée vers cette entreprise épistémique : « It is easier to make a theory of everything than it is to make a theory of something »[916]. Le premier chercheur dont la nouvelle direction prend les distances est Per Bak, l'un des plus critiqués par Horgan. Membre de l'*External Faculty*, porté dans la communauté par Philip Anderson, le physicien danois est une cible doublement facile, du fait de l'ambition visionnaire de son discours et de son affiliation collatérale :

> « It is not at all clear, écrit le postdoc Cosma Shalizi, what validation would even begin to look like for as all-encompassing and ambitious a notion as Bak's self-organized criticality. If it were the only way to get certain statistical properties, and earthquakes, evolution, etc., showed those properties, then that would be strong evidence that a SOC-like mechanism was at work ; but it seems that there are other ways of generating such distributions, which do not involve self-organized criticality […] The only way of figuring out which mechanism is active in particular cases would seem to lie in studying the details of that particular system, squashing the hope of finding general, details independent mechanisms »[917].

En 2001, Tom Kepler, vice-président des affaires académiques, se demande si cela a encore un sens de poursuivre une telle théorie générale : « Shall we continue to bet that a single universal and complete representation covering any given complex system – much less the world – is to be found? »[918]. Dans le numéro du bulletin qui revient sur les trente ans du SFI, David Pines repère dans un workshop de 1993 le lieu où le centre

[912] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 8.
[913] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2, p. 28.
[914] Entretien avec anonyme.
[915] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 25.
[916] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1998, Vol. 13, Number 2, p. 8.
[917] *Ibid.*, p. 12.
[918] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 32.

déclare son échec et son abandon dans la poursuite d'une théorie générale des systèmes complexes, et par là même d'une « science de la complexité » :

> « In 1993 SFI held a major workshop to define complex adaptive systems and assess the status of its initial quest for a science of complexity. As the title of the resulting proceedings – 'Complexity : Metaphors, Models, and Reality' – suggests, in the course of that workshop the dream of a unified theory of complexity was abandoned. […] By the end of the workshop the participants agreed that while complexity is difficult to define, and that there can be no unified science of complexity, it is highly useful to devise models of a wide variety of systems and ask to what extent the ideas behind a model that describes complex behavior in one system might be applicable to understanding another system »[919].

Robert Eisenstein, lors de sa présidence, retournera à donner comme priorité de l'institut la *tendance unificatrice* fondante une science de la complexité, malgré les sept ans de Goldberg qui l'avait effacée des discours de l'institut[920]. Eisenstein avait des contacts avec les *Senior Fellows*, mais ne durera pas longtemps. Une fois interrompu son mandat dans le mécontentement général (« he was moving kinda at Washington DC speed, which is slow »[921]), il laisse sa place à West. L'ambition unificatrice retourne au galop sous la présidence de ce physicien, en renouvelant toutefois l'esprit initié par Goldberg :

> « Bringing brilliant minds together to attack some of the big problems that might otherwise fall between the cracks is our major challenge. For example, SFI is particularly well positioned to facilitate serious interactions between those from the harder sciences of physics, chemistry, and mathematics with those from the softer, more qualitative biomedical and social sciences. To what extent (if at all) can these be put on a more quantitative, mathematical, predictive basis derived from 'universal' underlying principles and laws ? »[922].

Pour ne donner qu'un exemple de la démarche, un concept – par exemple celui de vieillissement – est analysé par plusieurs chercheurs et chercheuses de disciplines différentes, chacune étant censée apporter sa manière d'aborder le phénomène en étude. Après que le concept a été décliné par plusieurs cultures épistémiques, le groupe tente une unification théorique et, si possible, mathématique :

[919] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, p. 24.
[920] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 0.
[921] Entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
[922] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1, p. 2.

> « Can we conceive of an integrated, comprehensive theory of 'aging' as a general concept that unifies the aging of rocks, the planet, the solar system, and the cosmos, with the aging of airplanes, bridges, cities, societies, and, of course, biological organisms – especially ourselves? »[923].

Bien que, dans les dix dernières années, la rhétorique officielle du SFI ne vise plus à une science de la complexité ou à une unification entre tous les systèmes complexes sous un même parapluie théorique et mathématique, une certaine *tendance unificatrice* résiste chez certains membres de l'institut. Le mathématicien et informaticien David Wolpert, par exemple, utilise une métaphore efficace : « The other sciences are islands but all those islands are standing […] on bedrock. And what complex system science is trying to do I would say is understand what's going down at that bedrock that's relating all these islands »[924]. En même temps, un postdoctorant de l'institut, Joshua Grochow, travaille à une théorie mathématique générale pour les systèmes complexes[925]. Ces exemples restent toutefois minoritaires, dans un environnement où la plupart des membres ne considèrent pas qu'il existe une discipline de la complexité, et où les généralités peuvent être trouvées toujours et seulement au niveau d'une discipline (par exemple, l'écologie), d'une aire disciplinaire (par exemple, les sciences de la vie) ou encore d'une thématique transversale (par exemple, le vieillissement). Ce type de discours généraliste et généralisateur ne convient pas seulement aux physiciens, il a évidemment réussi à attirer aussi des individus et des groupes sociaux issus du monde des affaires.

Encadré 10. La tradition des systèmes dynamiques : le SFI et le chaos

Les historiens Sam Schweber et Matthias Wächter[926], ainsi qu'un groupe de chercheurs et chercheuses français des SSC qui les citent, voient le domaine fondé par le SFI comme l'héritier « des sciences d'après-guerre nées autour de l'ordinateur : la recherche opérationnelle, la théorie des jeux et la cybernétique »[927]. Même si Cowan, dans un entretien de 1988, cite John von Neumann et Herbert Simon[928], et même si, en septembre 1997, Melanie Mitchell donne une conférence dans laquelle elle retrace l'histoire des SSC, en montrant comment « John von Neumann, Norbert Wiener, Alan Turing et Stanislaw Ulam […] ont influencé et guidé le travail actuel de manière consciente et inconsciente »[929], la thèse de Schweber et Wächter est invalidée par notre Prologue et par notre chapitre 3. Les évidences présentes dans les bulletins du SFI sont légion : nous en donnons quelques-unes de plus dans cet encadré, après avoir rappelé l'histoire de la théorie du chaos.

La théorie du chaos

[923] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 1.
[924] Entretien avec David Wolpert, 06.10.16.
[925] Entretien avec Joshua Grochow, 07.10.16.
[926] Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *op. cit.*
[927] Bertin, E., Gandrillon, O., Beslon, G., Grauwin, S., Jensen, P. & Schabanel, « Les complexités : point de vue d'un institut des systèmes complexes », *Hermès*, 2011, n. 60, p. 148.
[928] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 5.
[929] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 8.

L'un des travaux les plus complets sur la théorie du chaos a été publié par les historiens des sciences français, David Aubin et Amy Dahan[930]. Les auteurs relèvent une tension disciplinaire et historiographique entre les mathématiciens, qui tendent à appeler le domaine du chaos « théorie des systèmes dynamiques », et les physiciens, qui tendent à l'appeler « théorie du chaos déterministe » ou simplement « chaos ». Ainsi les uns défendent une certaine continuité entre les théories les plus modernes et les études de Poincaré, tandis que les autres soulignent davantage l'élément de rupture du chaos par rapport à ce qui avait été fait auparavant. Aubin et Dahan proposent de trancher la question en parlant d'« *un vaste processus de convergence socio-disciplinaire et de reconfiguration conceptuelle* »[931], qui classerait l'émergence de la théorie du chaos ni dans la catégorie des révolutions ni dans celle des simples élargissements du domaine d'application d'une certaine théorie mathématique. En effet, les historiens montrent que les bases des mathématiques des systèmes dynamiques jetées par Poincaré, Hadamard, Duhem, Kolmogorov et d'autres n'ont jamais été oubliées. Les années 1970 sont le moment d'un travail international de synthèse de ces outils dans une théorie cohérente, entreprise commencée par le mathématicien américain Stephen Smale à Berkeley. Les contributions du météorologue étatsunien Edward Lorenz, du mathématicien français René Thom, du physicien mathématicien belge David Ruelle et du physicien russo-belge Ilya Prigogine, parmi d'autres, ont enrichi la théorie de nouveaux principes et modèles mathématiques, en la rendant célèbre grâce à la publication de livres vulgarisateurs à succès et unifiée grâce à l'organisation de colloques « fondateurs » à la fin des années 1970[932]. À la question sur le statut du chaos aujourd'hui, Ruelle nous a répondu ainsi :

> « Il y a eu une grande époque du chaos avec une collaboration multidisciplinaire qui ne pouvait durer que tant qu'il y avait des résultats nouveaux. Dans la mesure où les méthodes et les résultats sont enseignés dans les écoles d'ingénieurs et autres, le chaos n'est pas mort, mais la période de productivité multidisciplinaire est terminée »[933].

Aubin et Dahan concluent leur article en suggérant que non seulement la « science du chaos » n'existe plus en tant que domaine de convergence sociale, mais que d'autres domaines, comme les sciences de la complexité, sont en train de recouvrir ses positions sociales[934]. Notre histoire des SSC se propose comme une continuation de tel article, là où ses auteurs l'avaient interrompu.

Les SSC et le chaos

En effet, les éléments de continuité entre le SFI et le chaos sont multiples. Mitchell Waldrop, en se faisant porte-parole de l'institut, a expliqué que si la théorie du chaos avait déjà montré que l'on peut parvenir à des comportements complexes en partant de règles simples, celle-ci n'avait pas permis de traiter les systèmes complexes organisés, à savoir biologiques et humains[935]. Un certain nombre de scientifiques ayant participé à la mouvance du chaos sont passés par le SFI. C'est le cas par exemple des physiciens américains Peter Carruthers, Norman Packard et Doyne Farmer[936]. D'autres exemples justifient notre proposition de catégorisation des SSC dans la lignée des systèmes dynamiques.

En septembre 1987, le SFI organise un workshop, où des économistes, des physiciens et des biologistes, avec le support de la Citicorp et de la Russell Sage Foundation, discutent du concept d'équilibre en économie. Pour aborder les comportements complexes et chaotiques de l'économie globale, ces chercheurs font appel à des mathématiques non-linéaires[937] (outre qu'aux approches de la physique statistique et des algorithmes génétiques[938]). Dans l'éditorial du bulletin de l'hiver-printemps 1988, Cowan écrit : « We constantly see new evidence that the importance of the ideas of complexity and chaos, driven by accelerating advances in

[930] Aubin, D. & Dahan, A., « Writing the History of Dynamical Systems and Chaos », *op. cit.*
[931] *Ibid.*, p. 275.
[932] Interview avec Grégoire Nicolis, 15.05.13.
[933] Mail de David Ruelle, 23.05.14.
[934] Aubin, D. & Dahan, A., « Writing the History », *op. cit.*, p. 327.
[935] Waldrop, M.M., *Complexity*, *op. cit.*, p. 12.
[936] *Ibid.*, pp. 69-70
[937] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 5.
[938] *Ibid.*, p. 7.

computer technology, is being more widely recognized »[939]. Dans un entretien de 1989, Gell-Mann explique que les scientifiques liés au SFI « utilisent la théorie du chaos pour prédire la structure des séries temporelles (de la météorologie aux marchés futurs !) »[940]. Doyne Farmer, physicien et économiste du LANL et membre de la première heure du SFI, explique dans une interview de 1990 que sa formation s'est faite dans le domaine du chaos[941] (et il n'est pas le seul). La mention à la théorie des fractales de Benoît Mandelbrot, un élément fondamental des mathématiques des systèmes dynamiques et du chaos, est constante depuis le début jusqu'à la fin de l'histoire du SFI. En particulier, sous la direction de Geoffrey West les fractales seront les outils les plus en vue, du moins dans les bulletins. Avant et même après la publication du livre de Mitchell Waldrop sur les premières années du SFI, le livre de Gleick sur le chaos est cité d'innombrables fois[942] et Gleick est invité à parler à l'institut en 1989[943]. Normand Packard et Christopher Langton lancent la formule « le bord du chaos » pour décrire l'état dans lequel les êtres vivants existent, à savoir entre l'ordre immuable et le chaos indéterminé[944]. Souvent les livres recensés sur le bulletin portent sur le chaos[945].

Les promesses adressées aux entreprises

L'autre versant du discours du SFI concerne l'application de ses théories aux « problèmes du monde réel ». Le deuxième président du SFI Edward Knapp, écrit dans l'éditorial du bulletin de 1991 : « the very 'real world' nature of the problems we study is making the Institute a real force in the scientific arena »[946]. Un entrepreneur de l'industrie informatique dit en 1992 : « complexity science has a range of real-world applications »[947]. Ginger Richardson, l'un des membres du staff editorial de l'institut, écrit en 2002 : « reading this issue before we went to press, I was struck by how nearly all the features describe work that's grounded in very real and current world problems »[948].

La contradiction apparente entre « théorique » et « appliqué au monde réel » est explicable par la nécessité (classique en science) d'opérer un *travail de démarcation* selon la définition qu'en a donnée le sociologue Thomas Gieryn[949]. D'une part, le SFI ne dispose pas de laboratoires *in situ* – ses seules infrastructures se limitent à des ordinateurs et à des *clusters* – et revendique donc une recherche « libre » et « fondamentale » : le biologiste Dan McShea explique que lorsque les scientifiques qu'il rencontre lui demandent où se trouvent les données produites par le SFI, il répond : « they're generating hypotheses here, not data »[950]. D'autre part, le centre

[939] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 2.
[940] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 14.
[941] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 22.
[942] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 4.
[943] *Ibid.*, p. 30.
[944] Packard, N.H., « Adaptation toward the edge of chaos », dans Kelso, J.A.S., Mandell, A.J. & Shlesinger, M.F., *Dynamic patterns in complex systems. Proceedings of the Conference in Honor of Hermann Haken on the Occasion of His 60th Birthday*, 1988, pp. 293-301.
[945] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 6.
[946] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 3.
[947] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 35.
[948] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1, p. 0.
[949] Gieryn, T.F., « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science : Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », *American Sociological Review*, 1983, vol. 48, n. 6, pp. 781-795.
[950] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 7.

cherche le soutien financier du monde des entreprises et doit se défendre de ses détracteurs qui l'accusent de faire une science « fact-free »[951]. En même temps, le responsable du bureau de presse de l'institut, en parlant des difficultés dans la collecte des fonds après 2008, dit :

> « We're always gonna be struggling. It's become harder since 2008. As the economy gets tight, people funding the institute get more conservative with their giving. To get people to fund science is difficult, when you have people starving in Africa or Syrian refugees. They tend to give this money to that. Generally speaking, all non-profits are doing bad. People want more and more tangible results. And we are theoretical institute and we are never gonna produce tangible results »[952].

De l'« utilité » de quelques projets

Nous avons vu la capacité du SFI de se prêter à une couverture médiatique importante. Face à la nécessité de défendre des résultats scientifiques concrets, entre la fin des années 1980 et le début des années 1990, les membres de l'institut se trouvent toutefois dans un entre-deux. En repensant au workshop qui a vu se confronter physiciens et économistes en 1988, Philip Anderson se dit orgueilleux[953] et souligne le sérieux de ces rencontres[954]. L'organisation du workshop en tant que telle est mise en avant comme un résultat ou un succès de l'institut, même si des nouvelles théories et des nouveaux articles ne sont pas encore à l'ordre du jour. En même temps, nous relevons une ambivalence temporelle dans le discours d'Anderson, qui renvoie les résultats à la dimension du futur : « What final results may be forth-coming from these projects and SFI's continuing research network and when they may develop are open questions. Market watchers will have to be patient »[955]. Il est vrai, cependant, que la préoccupation de mettre en avant des résultats scientifiques concrets n'occupe pas le SFI jusqu'aux premières années 1990. Jusque-là, très rares sont les projets avec des visées ouvertement applicatives. Devant le constat d'un report sur la recherche biomédicale de l'Académie Nationale des Sciences américaine, selon laquelle la « masse de données »[956] (l'aube des *Big Data*) risquerait d'obscurcir la recherche de lois biologiques, le SFI a organisé dans l'été 1987 une rencontre entre plus de cinquante scientifiques afin de mettre en place une « computerized 'matrix data base' »[957]. L'objectif technique étant de créer une « base de données de bases de données »[958]. À la différence de l'Institut des Systèmes Complexes parisien, dont la

[951] Horgan, J., « From complexity to perplexity », *op. cit.*
[952] Entretien avec John German, 23.09.16.
[953] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 19.
[954] *Ibid.*
[955] *Ibid.*
[956] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 4.
[957] *Ibid*.
[958] *Ibid*.

première raison d'être sera celle de fournir des plateformes aux organismes partenaires, le SFI ne poursuivra pas longtemps la construction d'une telle base de données ni il proposera plus de pareilles initiatives par la suite.

Un autre projet de recherche chapeauté par le centre et ayant des velléités d'application très ambitieuses, portait sur les problèmes géopolitiques de la stabilité écologique et militaire du monde entier. Dans le premier bulletin de 1988, l'on annonce une « rencontre exploratoire » entre scientifiques et conseillers en géopolitique pour discuter des « Elements of International Stability »[959]. En considérant le monde comme un système complexe, les participants se donnaient pour mission de parvenir à un modèle capable d'aider à éviter une guerre nucléaire et l'effondrement des écosystèmes[960]. Dans ce projet appelé « Crude Look at the Whole », même si une mention explicite au Club de Rome n'est pas présente dans les bulletins, le modèle World employé pour le livre *Limits to Growth*[961] dans les années 1970 devait certainement être la référence, surtout si l'on compare World au modèle qui est issu du SFI (figure 1). En 1990, ce projet prend le titre de « Multiple Paths toward a Sustainable Human Society »[962]. Ensuite le SFI organise « Project 2050 », dont CLAW sera une sous-partie, en collaboration avec le World Resources Institute et la Brookings Institution, pour se demander comment assurer une transition vers une société soutenable. Les systèmes d'information, la gouvernance et le développement économique étaient censés être simulés par des MBA tels qu'ECHO de Holland et *SWARM* de Langton[963], ou encore par l'Artificial Social Life de Joshua Epstein et Robert Axtell[964].

Les rencontres visaient à faire un *brainstorming* autour des scénarios et des modèles computationnels susceptibles d'être utilisés dans le projet. À propos des systèmes politiques, culturels et idéologiques, on lit dans le bulletin de l'été 1994, qu'ils sont à la fois « essentiels » et « difficiles à quantifier », et donc « négligés » dans les modèles habituels[965]. Ce programme de recherche, guidé par Cowan, n'a pas eu de suite ni a produit de résultats tangibles ; il s'agit, d'ailleurs, du seul exemple qui a temporairement rapproché le SFI d'un *think tank*[966].

---

[959] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 16.
[960] *Ibid.*
[961] Meadows, D.H, Meadows, D.L., Randers, J. & Behrens III, W.W., *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, New York, Universe Books, 1972.
[962] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, pp. 19-20.
[963] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, pp. 9-10.
[964] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1, p. 16.
[965] *Ibid.*
[966] Cowan et Gell-Mann font plusieurs fois mention de leur intérêt pour les problèmes géopolitiques, ayant été l'un conseiller du gouvernement et l'autre de la *Rand Corporation* : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 11.

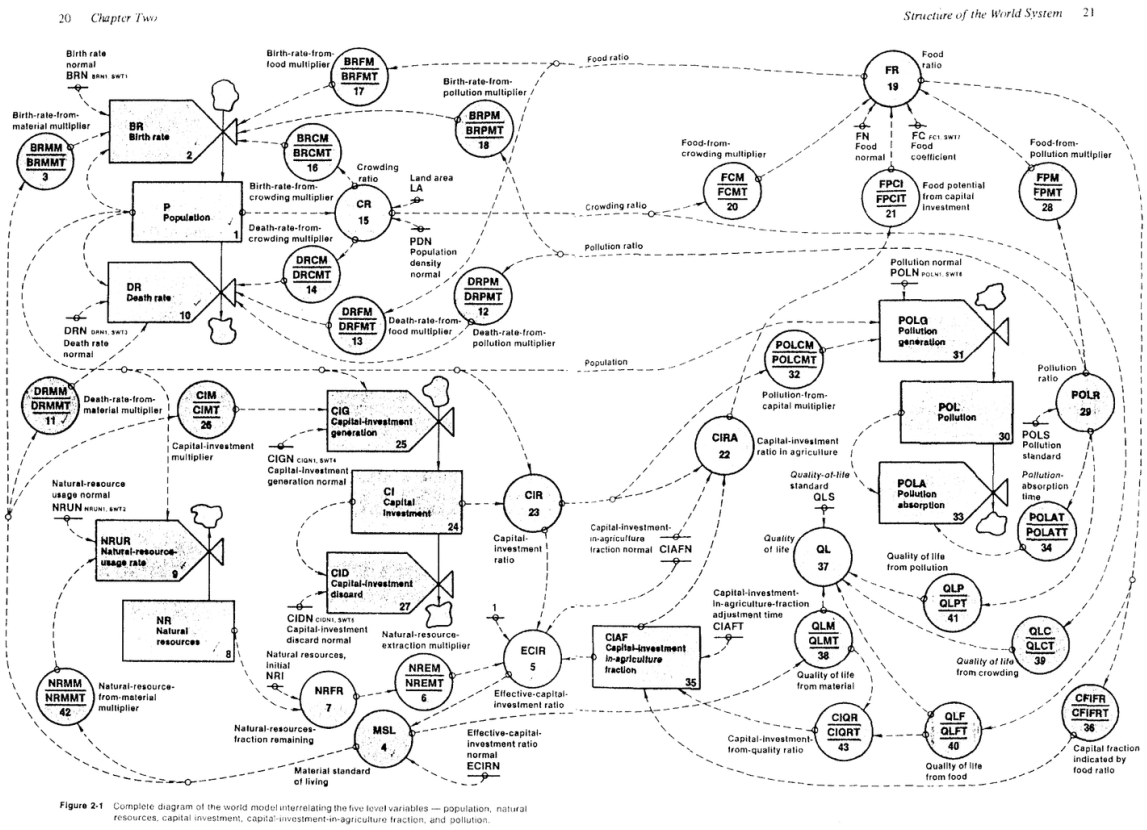


Figure 1. Le modèle « World » issu de Forrester, J., World Dynamics, Cambridge, Wright-Allen Press, 1971, pp. 20-21.

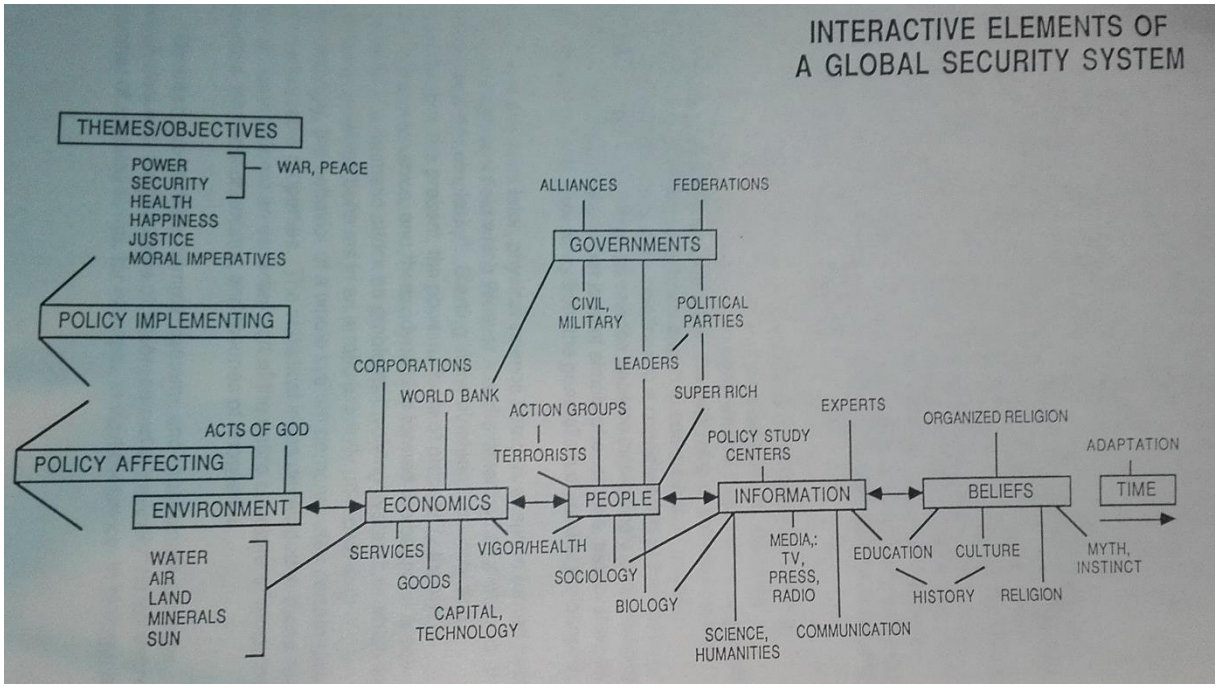


Figure 2. « Interactive Elements of Global Security System ». Boîte d'archives « SFI Concepts mission statements 1984-1989 »

La priorité des donations privées

Si dans les premiers dix ans du SFI les financements provenaient surtout des structures gouvernementales et des fondations, à partir de la présidence d'Ellen Goldberg les

donations privées atteignent les deux tiers du budget total de l'institut – ce pourcentage se maintiendra jusqu'à aujourd'hui. Même si les archives montrent que l'intention de parvenir à des modes de financements innovants était présente dans les discours des fondateurs, elle ne sera mise en place que plus tard. Pour atteindre cet objectif, des stratégies diverses ont été mises en place. En premier lieu, nous avons observé le déploiement d'une stratégie discursive concernant le « sérieux » et l'utilité de la science menée par l'institut. À partir de la prise de fonctions de Goldberg avec la nouvelle vice-présidente des affaires académiques Erica Jen, une prise de distance par rapport à la première période du SFI est mise en scène. À la question sur l'impact le plus important du SFI, en 1996 Jen répondra, en s'adressant à son intervieweur free-lance, qu'elle a du mal à le trouver :

> « If you ask how has it really changed things in terms of our understanding of natural or human phenomena, I'd have to think about it, because I don't think the answer is obvious. On the other hand, SFI has had, I think, real successes in terms of seeding networks of people, generating metaphors, making connections among disciplines, getting people to think in new ways, training young people through the summer schools and workshops. That's one thing I think that SFI has been enormously good at : earning a lot of publicity, recognition, legitimacy, even acceptance, for a new set of ideas »[967].

Ensuite, le duo féminin Goldberg-Jen met l'accent sur le rapport entre le SFI, centre théorique et computationnel, et les laboratoires affiliés au SFI, où les chercheurs et chercheuses conduisent des expériences de laboratoire : « [Erica Jen] is carrying out experimental work in the neurophysiology laboratory of Eve Marder at Brandeis University on the stomatogastric system (STG) of lobsters and crabs », avec l'objectif d'utiliser

> « the STG as a prototypical model for systems that use dynamic reconfiguration to perform switching among multiple functional tasks. The research could be relevant to the study of a broad range of systems in which a specific task is accomplished not by the activation of an appropriate pre-existing subsystem, but through the actions of a network that selects, organizes, and activates itself to perform that task. Examples might include the design of computational architectures, the dynamics of identity and learning in social networks, and task allocation in social insect colonies »[968].

[967] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 11.
[968] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. H.

Le chimiste et physicien australien, Sir Robert May, qui dès 2000 codirige avec Harold Morowitz le conseil scientifique, fait un rappel à l'ordre dans le bulletin de l'été 2001, en défendant deux positions : l'objectif d'une théorie générale des CAS doit être abandonnée, tandis qu'il faut faire de la science concrète, applicative et capable de résoudre les problèmes du « monde réel »[969]. Après avoir tissé, lui aussi, l'éloge des capacités communicationnelles du SFI dans la publicisation de ses théories, May arrive à critiquer une partie de la recherche de la première période en la qualifiant de « blather », baratin[970]. Ce n'est pas un hasard que les recherches liées au centre que May considère comme les plus significatives ne sont pas affichées « SSC » :

> « Among projects he admires he cites Alan Perelson's work on theoretical immunology […] ; and work on allometry led by Geoff West and Jim Brown that gives 'a really novel twist' to the ideas of the early 20th-century pioneer D'Arcy Thompson. 'Neither of these examples offers a transforming insight into a theory of complexity', he says, 'but they are using tools in the style that sparked the creation of the place' »[971].

Pour les autres théories étiquetées SFI, par exemple l'ambitieuse criticalité auto-organisée de Per Bak, « May souhaite la voir assise sur des données réelles »[972].
Tout ce tournant est, en premier lieu, la conséquence des pressions extérieures et intérieures à l'institut, même si dans le discours de May le problème est déplacé dans le futur : « I think as the Institute becomes more successful […] people are going to ask more critical questions about exactly what its accomplishments are »[973]. May suggère de renforcer les études en biologie, à l'ère de la « génomique »[974]. Le contexte qu'il imagine pour cela est celui d'un centre qui n'affiche pas des ambitions démesurées, mais qui fait de la recherche cumulative, modeste et solide[975]. La deuxième raison pour ce tournant applicatif est donnée précisément par la source, principalement privée, des financements de l'institut.
Si politiquement le SFI a toujours essayé d'afficher une neutralité et un œcuménisme idéologico-politiques[976], le point sur lequel il n'y a jamais eu de dissension, c'est l'ouverture au monde des entreprises (comme si cela n'était pas idéologique).

---

[969] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, pp. 2-6.
[970] *Ibid.*, p. 5.
[971] *Ibid.*
[972] *Ibid.*
[973] *Ibid.*
[974] *Ibid.*, p. 6.
[975] *Ibid.*
[976] Dans un article du bulletin du printemps 2000 dédié à une étude sur le rôle des stimuli de l'environnement dans le développement cérébral des enfants, l'approche du SFI est définie comme « apolitique » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 5. Mais en même temps, Cowan, qui en est le porteur, anticipe les impacts possibles d'une telle étude sur la société et sur les politiques publiques : « The agenda goes beyond SFI's apolitical approach to science because a study of this type and magnitude could result in major changes to social and educational policy if it provides empirical proof that enriching any child's envi-

Quelles priorités pour les « problèmes du monde réel » ?

Nous avons vu que Cowan s'intéresse, entre la fin des années 1980 et le début des années 1990, aux problèmes géopolitiques mondiaux, notamment la paix nucléaire et le risque d'effondrement des écosystèmes. Dans le numéro de l'hiver 1995-1996, deux membres du SFI écrivent un article sur l'extinction, définie comme la « manifestation la plus fondamentale et irréversible de la perte de la biodiversité »[977]. En 2007 West indique les « problèmes urgents » suivants : « climate change, violence, terrorism, epidemics, and pandemics »[978]. En visant l'enrichissement des modèles économiques, Brian Arthur taxe d'irrationnel le raisonnement économique qui, au nom d'un gain temporaire de terres, porte les multinationales à déboiser l'Amazonie, ce qui produit d'ailleurs le réchauffement climatique et l'élargissement du trou de la couche d'ozone[979]. Même Robert Anderson, de la Hondo Oil and Gas Company, parle de développement soutenable[980]. De temps à autre il y a des articles dans les bulletins dédiés à des projets sur le terrorisme[981], sur le développement d'un vaccin contre le sida[982] ou sur la modélisation de la réponse des espèces dans les écosystèmes au changement climatique[983]. Tout cela reste pourtant minoritaire par rapport aux travaux dédiés à des questions moins urgentes selon les termes du SFI lui-même.

On n'oublie pas que les bulletins s'adressent surtout aux financeurs privés et que donc le matériau présenté vise à intéresser notamment ce type de public. C'est indéniable que l'un des sujets qui constituent une constante dans les intérêts de recherche du SFI, ce sont les marchés boursiers et ses krachs, et en général la science économique[984] : « Why, se demande un journaliste freelance au nom de l'institut, do such crashes happen ? And how can we design and regulate markets to reduce the risk of them happening in the future ? »[985]. Ce passage date de 2008, mais si l'on revient en 1991, nous pouvons voir que les techniques informatiques innovantes développées au SFI sont déjà sur le banc d'essai de l'application à Wall Street. Lors d'une des rencontres du programme de recherche en économie tenu par le SFI, un groupe de banquiers et de financiers de Salomon Brothers, de Goldman Sachs et d'autres fonds d'investissement affirment utiliser certains des outils issus des SSC : « [Some investment funds] pointed

---

ronment in a benign, non-invasive way increases her capacity to learn. If the experiment is truly successful, asserts Cowan, 'it will be on the front page of every newspaper […] » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 5.

977 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 3.

978 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 1.

979 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 14.

980 *Ibid.*, p. 9.

981 *Ibid.*, p. 18.

982 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2012, Vol. 26, p. 28.

983 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 9.

984 Ayant une vision d'ensemble des activités du SFI grâce à ses bulletins, nous pouvons affirmer que les économistes ont toujours été présents dans l'histoire du centre, alors que la présence des représentants des autres sciences naturelles et sociales n'a pas eu la même constance.

985 SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 33.

to evidence that technical analysis might be helpful, and some claimed that they were already using neural networks and genetic algorithms to make better than average returns on their investments »[986]. En 1993, un noyau d'économistes modélisateurs travaille à la mise en place de techniques de prédiction des marchés :

> « Some traders of financial assets claim that certain simple rules can be used to help forecast future prices, although this claim has long been disputed. Another current SFI project is shedding light on this debate. Buz Brock, Josef Lakonishok, and Blake LeBaron have used new statistical tests to show that certain simple technical trading rules do find statistically significant patterns in both stock prices and foreign exchange rates »[987].

Il est vrai que l'« économie de la complexité », selon la formule connue de Brian Arthur, remet en question plusieurs présupposés de la théorie néoclassique dominante dans les milieux académiques[988]. Toutefois, il est important de souligner que les économistes du SFI n'ont jamais voulu parvenir à une autre science économique pour s'engager dans la mise en place d'un système économique et politique alternatif à l'actuel. Autrement dit, ils n'ont jamais mis en discussion le système néolibéral dominant : ils ont plutôt voulu mieux le comprendre pour mieux le gérer.
À part l'économie, d'autres problèmes ont attiré l'attention du SFI, de manière épisodique peut-être, mais la somme de ces projets est plus grande que la somme des projets qui s'inscrivent dans la liste des « problèmes urgents » donnée par West et que nous avons citée plus haut. Un de ces projets épisodiques concerne le sport : comment parvenir à des outils quantitatifs qui permettent à une équipe de gagner le tournoi ?

> « In June 2004, a genial assortment of business people, sports luminaries, and academics convened in Los Angeles to discuss whether the same sort of revolution might be brewing in the world of sports. The meeting was underwritten by SFI Business Network members Legg Mason Funds Management Inc. and Credit Suisse First Boston, and hosted by the Trust Company of the West. The question on the table : Can game theory, complexity science, or even neuropsychology lend useful insights into how to build better teams, rank teams and value players, and predict tournament outcomes better than the simple methods that are still the industry mainstay ? Many of the participants were optimistic that the answer is yes »[989].

---

[986] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 31.
[987] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 35.
[988] « The assumptions Arthur has taken to task are the very tenets of contemporary economics, the four commandments, as it were : 1) the assumption that the economy is based on diminishing returns, 2) the assumption that all the action that is interesting happens at equilibrium, 3) the assumption that there is a fixed number of goods and services, 4) the assumption that we can regard people as infinitely rational » : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2, p. 6.
[989] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2005, Vol. 20, Number 1, pp. 30-31.

Le SFI s'est intéressé également à la stylométrie, cette discipline à la croisée entre la linguistique ou l'histoire de l'art et la statistique ou l'intelligence artificielle, qui se donne comme fin de détecter automatiquement et efficacement l'auteur d'une œuvre :

> « Taylor [le chercheur invité par le SFI pour s'occuper de ce domaine d'investigation] has determined that a statistical analysis of the numbers that comprise the digital representation of the work can reliably separate authentic Pollocks from fakes. In so doing, Taylor's work is paving the way for a new world of visual 'stylometry', that is, a growing discipline that is making math out of that seemingly impossible to define thing that is style »[990].

L'année suivante, le bulletin contient un article qui rend compte d'un projet sur le rôle du sommeil chez les animaux et les humains[991]. En somme, les exemples de programmes de recherche qui, visant la résolution de problèmes concrets, s'écartent des « urgences » reconnues par le SFI pourraient être multipliés. Si l'on en vient, maintenant, aux dispositifs de financement mis en place par le SFI, nous pouvons mieux éclairer le rapport de l'institut à ses financeurs.

Le Business Network

Mitchell Waldrop nous a proposé une analyse intéressante de la relation entre les entreprises et le SFI, par rapport à la problématique de son indépendance intellectuelle :

> « Companies are not looking for somebody who tell them what they wanna hear. They have people in house who can do that. Ideally they would value the independence and creativity of SFI and they wanna be a part of that, they want to send some of their people to participate into discussion. I think the best of these companies realize that if you try to dictate what the research is, basically you kill the spontaneity and the independence, which is what they're looking for. A good, small company is searching for fresh ideas, fresh thinking, and new insights. If they are smart, they'll invest in SFI without strings attached »[992].

L'un des dispositifs de financement les plus importants des années récentes, auquel Waldrop fait référence dans cet extrait, s'appuie sur le monde entrepreneurial et s'appelle *Business Network for Complex Systems Research* (ou *BusNet*). Même si les missions de l'institut en 1986 incluaient celle de « servir l'industrie »[993], le *BusNet* ne

[990] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, pp. 10-17.
[991] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 13.
[992] Entretien avec Mitchell Waldrop, 02.12.16.
[993] SFI, « SFI Mission Statements, 1986 », boîte d'archives « SFI Concepts Mission Statements 1984-1989 ».

sera créé qu'en 1992. Au début, il fournit aux entrepreneurs des matériaux scientifiques sur les recherches menées au SFI et la possibilité d'échanger avec les chercheurs et chercheuses du centre, en contrepartie d'une cotisation annuelle :

> « In the summer of 1992 SFI inaugurated its Business Network for Complex Systems Research as a mechanism for companies to affiliate with SFI and to help support research. In return for an annual fee of $25,000, a company may send people to attend workshops and symposiums ; it routinely receives SFI Working Papers, books, and other publications ; and it has opportunities to meet with and explore problems of mutual interest with the hundreds of scientists who are associated with SFI in the course of a year »[994].

Au début, les compagnies les plus intéressées par ce dispositif viennent des secteurs de la finance et de l'informatique :

> « The Network was established in response to the growing interest in SFI research by companies. This has been especially evident in two areas : finance and computations. SFI's work in economics and in time-series data attracts the attention of banks and investment managers. And the work in computation has obvious appeal for computer companies – both hardware and software »[995].

En 1995, le *BusNet* organise deux conférences, une à San Francisco et une à Londres, avec le même titre : « Complexity and Strategy – The Intelligent Organization »[996]. Chacune accueille plus de deux cents professionnels, représentant de plus de quatre-vingt entreprises. La liste des affiliés passe de cinq membres en 1992[997] à vingt-et-un en 1995. Le succès du *BusNet* explose en 1997, lorsque les financements dépassent le million de dollars :

> « For the fiscal year ending December 1997, SFI received over $800,000 in unrestricted funding from our Business Network members. If you add the approximately $650,000 in restricted funding, SFI received $1.4 million from our Business Network members »[998].

---

[994] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 3.
[995] *Ibid.*, p. 47.
[996] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 5.
[997] Parmi les premiers contributeurs, l'on compte la *Citicorp*, la *Digital Equipment Corporation*, l'*Interval Research*, la *John Deere Company*, la *Batterymarch Financial Corporation* et *Maxis*, qui produit *SimCity* et *SimLife*. En 1993, s'ajoutent la *Legg-Mason Mutual Fund Investors* et l'*Advanced Research Projects Agency* : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2, p. 44. *SimLife* est décrit comme quelque chose de plus qu'un jeu, où l'on peut expérimenter les principes de la vie artificielle et où le joueur doit veiller à que les dynamiques complexes émergentes de l'écosystème simulé soient maintenues à l'intérieur de limites viables : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 4.
[998] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 11.

Les affiliés sont au nombre de cinquante-trois en 1998[999]. Les domaines représentés s'enrichissent : manufacture, conseil, aérospatial, communications, semi-conducteurs ; s'élargit aussi l'éventail des organismes partenaires : non plus seulement des compagnies américaines, mais aussi des compagnies internationales ou de pays étrangers, des non-profits et des agences gouvernementales[1000]. La liste des cinquante-cinq organismes qui ont souscrit le *BusNet* du SFI en 2007 donne une idée de la variété des intérêts en présence :

« AFRL, Dayton, OH
Argonne National Laboratory, Argonne, IL
Arience Capital Management, L.P., New York, NY
Baillie Gifford, Edinburgh, Scotland
Barclays Capital, London, UK
BGI, Kirkland, WA
The Boeing Company, Seattle, WA
Bridger Capital, New York, NY
Cisco Systems, San Jose, CA
CNO Strategic Studies Group, Newport, RI
CustomerSat Inc., Mountain View, CA
Davis Selected Advisers, L.P., New York, NY
Deere & Company, Moline, IL
Deloitte Touche Tohmatsu, Glen Mills, PA
eBay, Inc., San Jose, CA
Evidence Based Research (DOD), Vienna, VA
FedEx Corporation, Memphis, TN
Fidelity Investments, Boston, MA
Fontainebleau Resort, Las Vegas, NV
FX Palo Alto Laboratory, Palo Alto, CA
Google Inc., Mountain View, CA
HH Capital Partners, Santa Fe, NM
Insight Venture Partners, Aspen, CO
InnovationLabs, Orlando, FL
Intel Corporation, Hillsboro, OR
Lane Five Capital Management LP, Towson, MD
Legg Mason Capital Management Inc., Baltimore, MD
Lockheed Martin Corporation, Bethesda, MD
Los Alamos National Bank, Los Alamos, NM

[999] *Ibid.*, p. 6.
[1000] *Ibid.*, p. 11.

Marathon Asset Management, London, UK
McKinsey Global Institute, London, UK
Microsoft Corporation, Redmond, WA
The MITRE Corporation, McLean, VA
Morgan Stanley Investment Management, New York, NY
National Institute of Aerospace/NASA, Hampton, VA
Nativis, Inc., La Jolla, CA
NATS LLC, San Francisco, CA
Northrop Grumman Corporation Sector, Arlington, MA
Oppenheimer Funds, Inc., New York, NY
SAC Capital Advisors, Stamford, CT
SEAS DTC, Preston, UK
Sleep, Zakaria and Company Ltd., London, UK
Southeastern Asset Management, Memphis, TN
State Farm Insurance, Bloomington, IL
Steelcase, Inc., Grand Rapids, MI
Sun Microsystems, Palo Alto, CA
Telecom Italia, Milan, Italy
Thomson Scientific & Healthcare, Philadelphia, PA
Thornburg Mortgage Advisory, Santa Fe, NM
Toyota Motor Corporation, Aichi, Japan
Tudor Investment Corporation, Boston, MA
Watson Wyatt Limited, Reigate, UK
WCM Investment Management, Lake Forest, CA »[1001].

Historiquement le membre le plus engagé, notamment dans le développement et l'application de *SWARM*, était Robert Burkhart de la Deere & Company[1002]. Les simulations du SFI étaient vues, par les membres du *BusNet* en général, comme des outils pouvant fournir aux managers « hands-on experiences in experimenting (in the computer) with different business strategies »[1003]. Bill Miller, directeur de la Legg Mason Value Trust, qui possède en 1998 un capital de 6 milliards de dollars, explique ce que le *BusNet* lui apporte: « We are only interested in what works to help us make money »[1004], sans mentionner le fait que les conférences représentent pour lui un lieu de rencontre avec des investisseurs potentiels. La capacité d'attraction scientifique et intellectuelle du SFI, à des finalités entrepreneuriales, est réelle, puisque plus d'un manager a profité de la possibilité de passer une période de recherche au sein de

[1001] SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 37.
[1002] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 5.
[1003] *Ibid.*
[1004] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 13.

l'institut, pour travailler aux côtés de quelques scientifiques[1005]. Les affinités électives avec le monde entrepreneurial sont encore plus visibles dans le passage suivant, qui prend en compte l'histoire d'un donateur qui a conféré une bourse assez conséquente au SFI à l'occasion d'un projet de recherche sur les dynamiques évolutives :

> « The Santa Fe Institute is delighted to announce that it has received a three-year award from the W. M. Keck Foundation for $1.5 million in support of a new program in evolutionary dynamics. The Keck Foundation was established in 1954 by W. M. Keck, the founder of The Superior Oil Company. Keck placed a premium on imagination, innovation, and new technology ; relying on these principles The Superior Oil Company became one of the largest independent oil-producing companies of its time. Following the example of its founder, the W. M. Keck Foundation is also committed to using imagination and innovation in its grant-giving to support scientific discoveries and new technologies »[1006].

Nous interprétons les mots reportés d'Erica Jen comme une manière de revendiquer la préservation de l'indépendance de l'institut, en raison de la préexistence de l'intérêt du SFI pour cette thématique même avant la réception de la bourse de Keck :

> « According to Erica Jen, SFI vice president for academic affairs and principal investigator for the Keck proposal, 'SFI applied to the Keck Foundation for funding for evolutionary dynamics because we regard research in this area as one of the Institute's top priorities over the coming years. We think that the new program could help lay the foundations for a synthetic theory of evolutionary dynamics, and demonstrate its usefulness as a tool for understanding the fundamental processes that lead to change in both natural and social systems' »[1007].

Nous pouvons maintenant énoncer notre thèse : plus qu'une *convergence asymétrique* entre recherche et industrie, nous observons chez le SFI une *coïncidence idéologique* entre mode de production des savoirs et néolibéralisme. Ceci est frappant dans les mots du sociologue de l'économie David Stark :

> « 'I ask the question', says the softspoken Stark, 'are there some forms of organization that are more likely to be able to redefine, redeploy, recombine assets ? The answer : Yes, organizations with a capacity for reflexivity. […] Central to his work is a phenomenon he calls 'heterarchy'. […] There is uncertainty and self-organization. To prosper in such a situation, Stark believes management becomes the art of facilitating organizations that can perpetually reorganize themselves. 'The

[1005] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 18.
[1006] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. E.
[1007] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. E.

solution is to minimize hierarchy', he says. 'Authority is no longer delegated vertically, but emerges laterally' »[1008].

Si le passage que nous venons de lire illustre ce que Boltanski et Chiapello ont nommé la *cité par projet*, un passage de Cosma Shalizi dans le bulletin de l'hiver 1999 affirme explicitement les affinités intellectuelles pour le courant néolibéral[1009] :

« At this point we should introduce two ghosts who haunted the proceedings, the ghosts, aptly enough, of a pair of Central European economists, explorers of emergent and evolutionary phenomena, and of the way market economies fit into the larger society: Joseph Schumpeter and Freidrich Hayek, both originally of Vienna, later of Harvard and Chicago, respectively. They wrote their great works more than half a century ago, and yet echoes of their words could be heard throughout the discussion. Schumpeter's explains how capitalism requires (and supports) a larger society, many of whose institutions are run on quite antithetical lines. Hayek's explains how markets work as distributed computing mechanisms, adaptively optimizing the allocation of scarce resources, and how society itself is held together by conventions, and the shared expectations they produce. (Admittedly, his work speaks of 'spontaneous order' rather than the newer term, 'self-organization'). Today we have a much better body of abstract theory about emergence, and a wonderful assortment of models, and they make very nice analogies to what Hayek and Schumpeter talked about ; Hayek even lived long enough to appreciate some of them »[1010].

L'image de l'auto-organisation se marie avec un autre élément de l'horizon de rétrospection du SFI, en plus de celui des systèmes dynamiques : la théorie de l'évolution de Charles Darwin. Elle représente le trait d'union idéologico-épistémique qui lie les scientifiques du SFI aux membres du *BusNet* :

« they all were interested in gaining something Charles Darwin said successful species have in common : an adaptive or competitive edge. Most of the meeting participants were more than willing to entertain the SFI notion that biological systems, built upon a simple nucleic-acid alphabet and layered with features of self-organization and complexity, just might offer practical lessons for business. Why

[1008] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2, p. 3.
[1009] Loin de nous le fait de confondre le néolibéralisme avec la *cité par projet*. Le premier ne vise pas la justice et la grandeur légitime mais l'efficience des transactions à partir d'allocations et d'optimisations sur des marchés multiples. Toutefois, l'affinité entre les deux concepts est indéniable, car la *cité par projet* est un système idéologique véhiculé par plusieurs individus et groupes opérant dans le cadre d'une logique néolibérale.
[1010] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1, p. 10.

not use the incredible, multilayered sophistication of the mammalian immune system as a model for computer-virus detection and better computer security ? »[1011].

Dans ce contexte, les algorithmes génétiques, ainsi que la plateforme de modélisation ECHO[1012], lancés par John Holland, sont vus comme des incarnations de la théorie darwinienne et sont employés comme un outil de planification de l'entreprise. Deere & Company se lance dans l'application des algorithmes génétiques, un outil – dit-on – capable d'augmenter la productivité :

« With the introduction of the new scheduling system, the atmosphere of the factory improved along with productivity. Shop floor schedulers and supervisors were free to focus on strategic issues. Now, the [Genetic Algorithm] has the final word ; it produces daily and weekly schedules. Employees even began checking the GA-generated production schedules to plan their weekly activities – even vacation time »[1013].

Du BusNet *à l'*ACtioN

En 2015, le *BusNet* change de nom[1014] et mode de fonctionnement sous la présidence de David Krakauer, qui s'ouvrira davantage au monde des entreprises, renforcera les opérations de marketing et rapprochera le centre d'un *think tank*, comme l'atteste le discours de marketing bien rodé sur le dispositif :

« The traditional path by which those types of insights would get in the hands of someone making decisions would be, train people in Complex Systems Summer Schools and postdocs, who then go to universities, where they will train doctoral students but also a few undergrads, some of those undergrads will go to the industry and implement some of these insights. That's like a ten-fifteen years process. What ACtioN tries to do, formerly BusNet, is short-circuit that and we look at what's happening in science, right now at SFI, and we say, holy crap, this is something that people running this type of farms or of government agencies really should be aware of. If they saw the science, it would help them make better decisions »[1015].

La brochure dédiée au *Applied Complexity Network* (ou *ACtioN*) désigne la mission « applicative » des recherches menées au SFI – « our aim : to translate complex ideas into actionable solutions » – et indique le montant pour participer au « réseau » :

[1011] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 6.
[1012] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 27.
[1013] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 9.
[1014] Le nom de *BusNet* est considéré comme une incohérence pour un dispositif qui se tourne au-delà des entreprises.
[1015] Entretien avec William Tracy, 05.10.16.

40.000 dollars par an[1016]. Cette somme donne droit aux « services » habituels du *BusNet*, mais il y a des nouveautés, dont les plus importantes incluent : une *newsletter* (qui s'appelle *Vertex*) : « [Vertex] keeps you up-to-date on the latest ideas and publications from SFI, with a view to how those concepts apply to your organization and how your peers are tackling their toughest business challenges »[1017] ; la possibilité de mettre en place, « à un coût additionnel », des programmes personnalisés où les membres peuvent s'engager « encore plus profondément avec les chercheurs du SFI » ; la possibilité d'organiser, en plus des conférences habituelles avec tous les membres du « réseau », des rencontres « totalement customisés par rapport aux défis de votre organisation » ; la possibilité d'élaborer des « cours brefs » (coût entre 2000 et 8000 dollars) avec un « curriculum de la complexité qui répond aux intérêts et aux défis de votre organisation, avec un regard à l'application dans le monde réel » ; ainsi que la possibilité, prévue par l'option « Studio Retreat », dans lequel « un petit groupe de personnes de votre organisation » peut bénéficier d'une « expérience immersive au SFI »[1018]. Par les termes de la vente et de la publicité, on assiste à une *marchandisation du scientifique*, soit parce que les entreprises peuvent ainsi embaucher des jeunes chercheurs et chercheuses (on parle en effet d'« opportunités inégalées de recruter du personnel »), soit parce qu'elles peuvent solliciter les scientifiques en résidence, pour un support formatif ou pour du conseil – sachant que le travail du SFI « est entièrement non-classifié et que ses résultats sont publiés librement dans la littérature académique mondiale »[1019] et que donc l'exclusivité n'est pas au niveau des informations qui seraient confidentielles ou, précisément, exclusives. Le responsable d'*ACtioN* nous l'a répété deux fois : « We don't do work for hire »[1020]. L'intérêt des firmes est l'accès à l'information de manière prioritaire : « Usually companies that want to get involved with us just want early access to the kinds of theories we're working on »[1021]. Une ex-postdoctorante du SFI, issue d'un pays européen, que nous laisserons anonyme, nous explique la dynamique du rapport des scientifiques de l'institut avec les entreprises souscrivant au « réseau » *ACtioN* :

> « Il n'y a aucune obligation formelle (rien d'écrit dans le contrat de postdoc ni ailleurs) pour nous chercheurs afin de participer à ACtioN. Nous sommes toutefois incités, mais toujours avec discrétion et jamais de façon insistante. [Le responsable du dispositif] nous envoie un mail chaque fois qu'il a besoin de la participation active de la part des chercheurs, et de manière gentille (pas insistante du tout) il

[1016] SFI, « ACtioN. Applied complexity network @ the Santa Fe Institute », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
[1017] *Ibid.*
[1018] *Ibid.*
[1019] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[1020] Entretien avec William Tracy, 05.10.16.
[1021] *Ibid.*

nous demande notre disponibilité. Parfois il nous demande de faire des tutoriaux, genre deux leçons d'une heure, une heure et demi, devant la délégation de la firme en visite ; ou il nous demande de participer aux discussions dans lesquelles l'entreprise nous présente ses problèmes et de manière interactive on discute pour comprendre quels pourraient être les modèles/méthodes nécessaires pour aborder le problème ; ou alors on nous demande de dîner avec ces hôtes parce qu'ils voudraient nous connaître mieux, donc c'est une occasion de réseautage. Je n'ai jamais participé parce que malheureusement, quand il y avait les discussions ou les leçons avec les firmes, soit j'étais en voyage soit il fallait engager le weekend (que je suis toujours peu incline à faire) »[1022].

Les membres d'*ACtioN* reçoivent une « expérience personnalisée » : « ils viennent avec leurs problèmes et nous savons les orienter, leur proposer des méthodes, des approches *state-of-the-art* qui ont été développées dans d'autres contextes et on peut leur montrer qu'ils peuvent leur servir »[1023]. Cette chercheuse nous explique que les entreprises qui bénéficient de ce dispositif n'ont pas forcément des scientifiques ou des modélisateurs *in situ* : elles ont besoin d'une consultation externe pour être guidées vers des modèles qui résolvent des problèmes semblables et qui pourraient être adaptés au problème spécifique de la firme en question. En outre, lorsque l'entreprise adapte tel modèle, elle pourra non seulement bénéficier de l'expertise du SFI, mais aussi l'afficher auprès de ses clients, ce qui est un gage de crédibilité pour la firme. Notre interlocutrice qualifie les scientifiques du SFI qui collaborent avec l'un des membres d'*ACtioN* plus que comme des « consultants » comme des « conseillers » : « il n'y a jamais un contrat dans lequel le SFI s'engage à produire quelque chose de concret (comme du code en Python, un algorithme ou un modèle véritable, que l'entreprise amène chez elle et implémente comme une *black box*) »[1024]. Toutefois « le SFI est complètement ouvert à la possibilité que le chercheur se passionne pour le problème particulier de l'entreprise et qu'il soit donc motivé à développer des modèles »[1025] plus généraux : dans un tel cas, il s'agirait d'un *win-win game*, puisque la firme aura un modèle spécifique, tandis que le chercheur ou la chercheuse auront des données sur lesquelles travailler pour parvenir à un nouveau modèle et donc à la publication d'un article.

La *marchandisation du scientifique* sous Krakauer s'étend au-delà d'*ACtioN* : le nouveau président et son staff mettent en place des nouveaux programmes pour les donateurs individuels, selon le montant de la donation : « President's Circle »,

[1022] Entretien avec anonyme.
[1023] *Ibid*.
[1024] *Ibid.*
[1025] *Ibid.*

« Contributing Fellows » et « Complexity Society »[1026]. Le premier s'adresse à ceux et celles qui donnent entre 1000 et 4.999 dollars et offre les services suivants : « Science Club conversations with SFI researchers, breakfast science talks around the country, and preferred seating at SFI community lectures »[1027]. Le deuxième s'adresse à ceux et celles qui donnent entre 10.000 et 24.999 dollars : en plus des services précédents, ils ou elles bénéficient de la possibilité de « travailler avec la direction scientifique et le président du SFI, de supporter et rejoindre les ateliers scientifiques les plus importants et les groupes de travail, ainsi que participer à des dîners privés avec les scientifiques »[1028]. Le troisième programme, pour qui donne plus de 25.000 dollars, donne accès aux rencontres annuelles ouvertes seulement aux membres d'*ACtioN*.
Dans ce contexte, les valeurs de la *cité par projet* sont défendues avec orgueil, par exemple par Ginger Richardson en 2003, lorsqu'elle tisse l'éloge du dynamisme incessant de l'institut :

> « Anyone who dislikes change should not work at SFI. The constant variation in the Institute's scientist roster, permutations in our research agenda, and the almost constant alterations in the campus environment can sometimes make your head spin. […] In SFI's early years folks like George Cowan and David Pines were fond of describing the endeavor as a 'floating crap game', a clever metaphor that aptly depicted the fledgling organization's seemingly boundless flux. […] new approaches, research themes, and collaborators emerge here all the time »[1029].

L'affinité élective entre le SFI et le monde entrepreneurial concerne aussi un autre sujet, au-delà de la compétition darwinienne : l'innovation, déclinée dans plusieurs domaines onto-épistémologiques, et ses effets bénéfiques :

> « Biological recovery and innovation is the focus of a new SFI program headed by Smithsonian Institution paleobiologist Doug Erwin and funded by the Thaw Charitable Trust. The purpose of this new work, a component of the Institute's emerging program on evolutionary dynamics, is to investigate through theory, synthesis, modeling and field investigations the processes involved in the creation and establishment of biological novelty and the links between ecological recovery after biotic crises and evolutionary innovation »[1030].

L'indépendance scientifique et thématique du SFI est contredite par les mots de certaines figures importantes de l'institut. Edward Knapp par exemple parle de la

[1026] SFI, « SFI at 7200 Feet. A Resource Guide for the Board of Trustees of the Santa Fe Institute », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
[1027] *Ibid.*
[1028] *Ibid.*
[1029] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1, p. 0.
[1030] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2, p. 22.

difficulté d'aligner les intérêts de l'institut avec ceux des donateurs : « It takes time and patience and also extremely careful planning to make sure that the interests of the institute and the interests of potential donors coincide »[1031]. Sur le bulletin du printemps-été 1992, Susan Wider, *Director of Development*[1032], émet une hypothèse sur la raison selon laquelle les donateurs supportent le SFI : « because they sense an affinity between what they do in the corporate world and what SFI does in the scientific world – discover and organize new knowledge for the benefit of society »[1033].

Jusqu'ici, il a été question du SFI dans son ensemble. Cependant, si l'on parle des individus qui le composent, nous ne pouvons nullement généraliser, comme le montrent nos données prosopographiques. D'autres voix que la ligne néolibérale peuplent les corps des affiliés à l'institut.

Prenons l'exemple de Tom Ray. Écologiste puis informaticien, ce chercheur américain est à l'origine de la plateforme de MBA *Tierra*, une simulation d'organismes en évolution. Un bulletin reporte que, en parallèle de la mise en place du logiciel, Ray s'est soucié de proposer l'établissement d'une réserve dans une forêt tropicale au Costa Rica pour la sauver d'une destruction imminente « et de générer une économie préservationniste pour la zone à travers un tourisme naturel basé sur la communauté »[1034]. Avec le projet d'acheter 3.500 hectares de forêt, il reçut des financements de la John D. and Catherine T. MacArthur Foundation à hauteur de 250.000 dollars et de la National Fish and Wildlife Foundation à hauteur de 125.000 dollars[1035]. Dans le même esprit, nous ne pouvons pas ne pas citer, parmi les membres du SFI, Patricia Adair Gowaty, écologue écologiste et féministe, dont l'entretien résulte plus intéressant pour l'histoire du lien entre l'écologie et le féminisme que pour celle des SSC[1036]. Stephen Hubbell, mari et collègue de la précédente, que nous avons également rencontré lors de notre séjour américain, était surpris d'apprendre de nous que le SFI recevait des financements des compagnies pétrolières[1037]. Jennifer Dunne, vice-présidente pour les affaires académiques, était une activiste pour les droits civils et les droits des femmes pendant sa licence, et a travaillé pour un groupe environnemental pendant deux ans avant de devenir chercheuse[1038]. John Harte, autre écologue lié depuis longtemps au SFI, regrette le fait que « l'intérêt personnel, la voracité, la cécité » rallient plus que les actions collectives pour sauver l'humanité du désastre environnemental[1039]. Il repère dans les dix ou vingt prochaines années le seuil temporal au-delà duquel l'humanité risque le collapse. Il mentionne la solution du

[1031] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 11.
[1032] Il s'agit d'une figure chargée de chercher des financements.
[1033] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 35.
[1034] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 14.
[1035] *Ibid.*, p. 15.
[1036] Entretien avec Patricia Adair Gowaty, 21.09.16.
[1037] Entretien avec Stephen Hubbell, 20.09.16.
[1038] Entretien avec Jennifer Dunne, 06.10.16.
[1039] Entretien avec John Harte, 21.09.16.

problème des inégalités mondiales comme une prémisse à toute solution écologique. En même temps il ne condamne pas les spéculations boursières dans leur totalité, mais ses mésusages ainsi que le fait que les transactions ne soient pas taxées. Lorsque nous lui avons fait remarquer le fait que le SFI a toujours reçu des financements des compagnies pétrolières, il nous a répondu ainsi : « if they give some of their money to SFI then there's less money to give to a Republican congressman. […] in reality SFI will not be influenced by that money […] I haven't followed [SFI's] outreach so much but I hope they make it clear that we're not being bought »[1040]. L'anthropologue Paula Sabloff est très critique du système démocratique américain, qu'elle rapproche plus d'une oligarchie que d'une véritable démocratie, et souhaiterait un système sanitaire et éducatif gratuit[1041]. L'informaticien Cris Moore a milité pour le *Green Party*, est engagé dans l'inclusion des femmes et des minorités dans l'éducation, est favorable à une réduction des coûts universitaires en taxant les plus riches et en diminuant les dépenses militaires, bien qu'il se dise moins antimilitariste aujourd'hui que quand il était à l'université[1042]. De l'autre côté, un membre important de l'institut aurait un jour rigolé avec l'un de nos interviewés sur le fait que « la vie n'a aucun sens sans une décapotable »[1043]. La sociologie des membres est donc plurielle et aussi conflictuelle, comme le montre le cas d'un scientifique en résidence qui n'a pas de problèmes à accepter des financements de la DARPA, alors que l'un de ses postdoctorants s'y refuse[1044].

Renoncer aux généralisations absolues ne signifie pas s'interdire les généralisations relatives. En effet, cette multiplicité de voix n'est pas symétriquement représentée, ni dans le discours officiel du SFI, ni dans ses modalités de captation des fonds privés, ni, comme le montre la section suivante, dans sa gestion interne.

La gestion du SFI en tant qu'entreprise

En 1988, Stuart Kauffman pense à breveter une application de sa théorie de réseaux génétiques dans le domaine de la biomédecine, pour produire des nouvelles protéines et peptides[1045] ; neuf ans plus tard, il fondera Bios Group, une firme de conseil aux compagnies, qui utilisaient une partie des théories des SSC. En 1991, Doyne Farmer, Norman Packard et James McGill fondent Prediction Company, une entreprise de spéculation boursière. Dans cette section, ce n'est pas de ces deux expériences, ou d'autres similaires, dont nous voulons parler. D'autant plus que la direction du SFI n'a jamais vu de bon œil ce genre de *spin-off*. Ce qui nous intéresse ici pour clarifier

[1040] *Ibid.*
[1041] Entretien avec Paula Sabloff, 26.09.16.
[1042] Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.
[1043] Entretien avec anonyme.
[1044] Entretien avec anonyme.
[1045] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 12.

davantage le rapport du SFI avec le *régime de production des connaissances* dominant et pour comprendre les raisons qui ont poussé les *Senior Fellows* à fonder un institut de recherche et un nouveau domaine de savoirs, c'est sa gestion interne, non pas seulement en contact étroit avec les entreprises, mais *en tant qu*'entreprise privée. Même si, lors de la controverse sur l'acquisition de la résidence Hurley, le SFI dut prendre ses distances vis-à-vis des accusations qui l'assimilaient à une opération commerciale (« *SFI Is Not A Business* […] SFI does not receive money as compensation for producing a product or service. […] Unlike a business, SFI has no customers »[1046]**),** Bob Eisenstein a, en 2004, explicitement comparé l'institut à une firme : « SFI's connection to the business world, and the way it operates primarily with money from private sources rather than governmental funding, make it much like a business »[1047].

Pour un observateur externe aux États-Unis, le mode de fonctionnement d'un centre de recherche privé américain tel que le SFI peut paraître paradoxal. Si dans l'imaginaire européen la recherche n'est considérée comme autonome que lorsqu'elle est publique, le SFI voit les financements privés comme les seuls à même de garantir une telle autonomie d'esprit. En 1991, Marcella Austin, trésorière du SFI depuis 1988, explique que les donations d'un privé nécessitent d'une lettre qui spécifique à l'institut comment et quand l'argent peut être dépensé. Par contre, continue-t-elle, les bourses du gouvernement sont bien plus contraignantes, car il faut fournir aux institutions des rapports fréquents et réguliers sur l'état de la recherche, respecter un certain nombre de règlementations fédérales et subir des visites occasionnelles pour des audits : « The tracking of funds is endless »[1048]. Les contraintes des financements publics, perçues comme envahissantes et bureaucratiques, poussent les scientifiques, les administrateurs et le staff à préférer plutôt les diners privés. Parler d'*esprit gestionnaire*[1049] du financement public à la recherche américaine ou, si l'on veut, de *cité par projet* dans l'académie, cela veut dire que le choix d'une source de financement privée apparaît plus rationnel que le choix d'un financement public aux yeux des centres comme le SFI. Cela malgré, ou bien à cause de la possibilité réelle de disparaître. S'il est vrai que même une université publique peut ne pas être éternelle, le SFI se conçoit toutefois comme *intrinsèquement* précaire. Jusqu'à aujourd'hui, les financements publics ont surtout servi à l'institut comme gage de crédibilité face aux financeurs privés :

> « Although this award represents less than 10 percent of our funding (indeed, by design, only about one third is derived from government sources), it's extremely

[1046] SFI, « Santa Fe Institute Application Letter. James W. Siebert and Associates, Inc. April 8, 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[1047] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 5.
[1048] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 20.
[1049] Ogien, A., *Désacraliser le chiffre dans l'évaluation du secteur public*, Versailles, Quæ, 2013.

> important and we value it tremendously. We need that credibility and, by extension, the approval from the academic community, when it comes to soliciting funding from private foundations, universities, and other government agencies »[1050].

Le fait de se tourner vers les entreprises, les magnats et les fondations pour avoir des financements n'implique pas forcément le fait de se constituer en entreprise privée. Pourtant, ce qui est intéressant à remarquer, c'est que le SFI s'est venu assez rapidement à instituer comme telle. Les exemples qui illustrent ce point sont nombreux et hétérogènes.

Le conseil d'administration du centre recrute Susan Wilder en avril 1989[1051]. Le bulletin de la même année met en avant ses qualités, parmi lesquelles l'on énumère sa connaissance des langues étrangères et ses connaissances managériales. Pour donner un exemple de sa vision, le bulletin affirme que selon Wilder, tout membre de l'institut est partie intégrante de la machine financière :

> « Susan views each person associated with the Institute as a fundraiser, either active or passive. She defines 'active' fundraisers as those individuals who actually solicit funds from qualified prospects or who personally introduce potential donors to the Chairman and the President. 'Passive' fundraisers are those scholars and administrators who by their dedication to excellence carry out the mission of SFI »[1052].

Cette logique instrumentale, nous l'avons expérimentée sur notre propre parcours en direction du SFI. Si, lors des requêtes d'entretien dans les pays européens, aucun des scientifiques ne nous a jamais demandé explicitement un retour en échange du temps qu'ils ou elles allaient nous dédier, nous avons évidemment fait une *faute grammaticale*[1053] lors de notre approche auprès du SFI. Il nous a en effet été reproché d'avoir trop demandé à l'institut sans rien lui offrir en échange. Comme la sociologie pragmatique l'enseigne, toute *faute grammaticale* ou, pour le dire autrement, toute *réouverture d'une boîte noire*, est heuristique. Nous allons donc raconter la nôtre pour ce qu'elle nous permet de mettre au jour.

En février 2015, nous envoyons un mail à notre contact à l'institut, qui nous met en relation avec sa hiérarchie supérieure. Celle-ci nous demande plusieurs éléments (un CV, une lettre décrivant nos intentions de recherche et deux ou trois lettres de recommandation) pour entamer le processus d'accueil, qui doit être validé par le conseil d'administration. Après des mails de notre part qui visaient à clarifier notre approche observatrice et non-intrusive, la Direction nous demande d'organiser une

[1050] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 1.
[1051] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 21.
[1052] *Ibid.*
[1053] Lemieux, C., *Le devoir et la grâce*, Paris, Economica, 2009.

première visite de deux jours : si celle-ci se passe bien, on nous dit, nous aurons l'accord pour revenir plus longtemps. Nous répondons que deux voyages Paris-Santa Fe dépassent nos possibilités financières et bureaucratiques, et nous réussissons à tomber d'accord sur un compromis : réaliser quelques courts entretiens avec des chercheurs et chercheuses de l'institut via Skype, afin d'établir un premier contact et une relation de confiance. Dans le premier entretien, nous recevons un rappel à l'ordre et un conseil de la part de notre contact sur quel comportement à tenir :

> « we're actually a small building, and there's always a lot of people that want to come[1054]. So unfortunately the question that [the Direction] has to ask is, what is it that why you and not somebody else ? I'm sorry, you have to put yourself in that frame of mind, and therefore say why what you want to do here is compelling for the Institute, and why we as a community would benefit from having you here, that's the question »[1055].

Malgré nos multiples élucidations à l'égard de notre approche sociologique et ethnographique qui se propose d'*étudier les* SSC et non pas de *contribuer aux* SSC, et en dépit de notre refus de recevoir un bureau (qu'en effet nous n'avons jamais utilisé au cours de notre séjour), notre contact nous répète la nécessité, pour nous, de nous rendre intéressant par rapport à d'autres aspirants visiteurs, dans une optique compétitive :

> « But other people will be a little bit more, you know, come on, you know ? [They'll say] 'Tell me what you are really after', you know ? And if you can do that [à savoir, te rendre intéressant], then I think they will give you the OK to come visit. But it's hard to just say that you just can come visit and stay for two months, and you don't know exactly what you are gonna be doing, and you are gonna be taking effectively the place from somebody else »[1056].

Voici donc le conseil de notre contact pour nous rendre intéressant : un véritable *do ut des* :

> « I think you have to put yourself in our position. We are all very busy, have lots of things to do. We are really asking the question, why should I talk to Fabrizio, when I could be writing a paper ? And so you have to be able to be convincing and answer that question well. And efficiently. So that you get your questions quickly

[1054] Au cours du mois que nous avons passé à l'institut, nous n'avons pas observé d'engorgements de bureaux ou de parkings…
[1055] Entretien avec anonyme.
[1056] Entretien avec anonyme.

and you get people to answer you and you can get the information you want and people feel what they're doing is valuable, but also doesn't take a lot of time »[1057].

Partout ailleurs, y compris dans d'autres centres de recherche étatsuniens, l'*éthos* scientifique se manifestait différemment : nos interlocuteurs et interlocutrices acceptaient de nous voir pour les raisons les plus diverses : 1) curiosité ou plaisir personnel d'une discussion socio-historique ou épistémologique, 2) volonté de rendre un service à l'histoire des SSC, 3) volonté de rendre service à un étudiant, etc. Dans le cas du SFI, nous avons dû monter un dossier en offrant plusieurs services en retour, comme par exemple : 1) deux articles issus de notre thèse à faire paraître sur le bulletin ou sur le site du SFI, 2) mettre en contact des scientifiques de la communauté française des SSC avec quelques-uns des membres du SFI que nous allions interviewer, 3) traduire la page Wikipédia dédiée au SFI en italien et en espagnol. Le fait que nous n'aurons aucun feedback sur ces propositions, ni avant ni après notre séjour à l'institut, nous suggère que ces requêtes relevaient plus de la prise de précaution que des vraies nécessités administratives. Ce n'est pas question d'utilitarisme, ou pas principalement ; ce n'est pas non plus (seulement) question de l'impact qu'aurait pu avoir le livre critique de Stefan Helmreich sur l'institut, texte qui a peut-être instillé dans le SFI une méfiance vis-à-vis des SHS. La raison principale de ce comportement relève, selon nous, plutôt du mode de fonctionnement propre de ce centre de recherche privé et non-lucratif.

Une autre expérience personnelle peut éclairer davantage ce mode de fonctionnement entrepreneurial. Une fois sur place, nous avons commencé à interviewer toute personne disponible, qu'elle soit un scientifique ou un membre du staff. L'une de nos premiers interviewés fut la bibliothécaire, Margaret Alexander, qui nous conseilla d'aller voir plusieurs autres membres du staff pour répondre à un certain nombre d'interrogations auxquelles elle ne pouvait pas répondre. Nous suivons son conseil pendant la première semaine, à la fin de laquelle nous recevons un mail laconique de la Direction nous convoquant le lundi suivant : « I'd like to touch base with you on Monday briefly. Please come to my office at 10 am ». La personne en question nous reçoit le jour établi à l'heure indiquée avec une tension palpable et un air menaçant, en justifiant cette rencontre afin de s'assurer que nous sommes « sur la même page ». Elle nous reproche, tout d'abord, d'avoir interviewé jusque-là de nombreux membres du staff, plus que des scientifiques, et que de cela nous n'avions pas fait mention dans notre lettre de présentation. Nous répondons d'abord que ce n'est pas vrai, car nous avions bien dit que nous aurions voulu interviewer par exemple la bibliothécaire, deuxio que c'est sur conseil de cette dernière que nous l'avons fait et, tertio, que nous

[1057] *Ibid.*

n'avons forcé personne à nous parler[1058]. Elle nous reproche ensuite d'avoir posé des questions gênantes à nos interlocuteurs et interlocutrices. Nous demandons à quoi elle faisait référence et recevons en réponse qu'il s'agissait de questions assez précises que nous aurions posées sur les modes de fonctionnement de l'institut[1059]. Elle nous accuse, alors, d'être un journaliste d'enquête en cachette ou en tout cas d'avoir dissimulé les vraies intentions de notre visite. Nous spécifions que nos questions découlent de nos méthodes sociologiques et historiques, attentives aux fonctionnements institutionnels. Elle nous dit, avec un ton sévère, que si nous sommes encore là, c'est parce que la Direction a décrété que nous sommes en bonne foi. Elle nous communique pour autant qu'elle n'est plus disponible pour nous rendre des services. Et que dorénavant, pour pouvoir interviewer qui que ce soit, nous devons en informer la Direction de manière préalable. À partir de ce moment-là, le comportement des membres du staff à notre égard change sensiblement : si au cours de la première semaine, les personnes que nous croisions étaient bienveillantes à notre égard, les regards devinrent maintenant circonspects. L'information avait circulé et les rangs avaient été resserrés : l'esprit de firme se manifeste dans l'unité de ses membres et dans leur attention pour l'image de l'établissement. Nous perdons l'opportunité d'interviewer le Président, mais non pas celle d'approcher tous les autres scientifiques en présence – cela n'est pas vu comme une menace. Nous réussissons tout de même à interviewer aussi d'autres membres du staff et à collecter d'autres importantes informations, non sans d'abord spécifier nos intentions épistémiques et revenir sur le malentendu de la première semaine…

Sur des documents internes, le nom de l'institut est accompagné par l'inscription « Inc. » : ces courtes auto-ethnographies montrent les formes organisationnelles qu'une telle inscription implique dans les dynamiques internes de l'institut[1060]. Tel qu'un produit à vendre, le SFI ne peut pas se permettre d'avoir des comptes rendus négatifs sur son compte : la présence d'un journaliste, d'un écrivain ou d'un sociologue est acceptée, soit à travers une bourse qui puisse garantir un récit

[1058] Déjà dans le mail du 24 février 2015, une année avant notre terrain, cette personne tenait à nous souligner que les chercheurs et chercheuses en présence lors de notre séjour n'auraient nullement été obligés de répondre à nos questions… comme si à un moment quelconque nous puissions les contraindre avec la force : « In terms of you talking to/interviewing people, this would of course be entirely voluntary on the part of SFI scientists or staff – if they were willing to be interviewed, fine, but they would not be required to ». Bien sûr.

[1059] « By and large we wanna pretty good show here. So misinformation is more like it makes us look worse than better, because the truth is actually pretty good. We do good things here, but with that sort of backdrop, usually when people are going to ask questions like that about organization, there's two ways you can handle. One way is you're like an investigatory journalist, in which case you call to SFI and they will tell, we have an office, someone whose job is to talk with the press. If you come in here under the auspices of being a doctoral student, the default is, we wanna help as much as possible, because one of the things we do is to help doctoral students explore complex systems. That is part of our deep core mission. […] But then when it sort of shifts without warning into things about the financial structure of the institute, people can get very nervous » : entretien avec anonyme.

[1060] Nous avons raconté une partie de nos mésaventures à un membre du corps scientifique de l'institut, qui nous a dit qu'il ou elle souhaiterait un système plus semblable à celui européen, en tout cas plus public. Ces voix critiques vis-à-vis du système académique américain dominant restent minoritaires et silencieuses.

bienveillant, voire promotionnel, soit à travers un accueil sans frais d'un externe à condition que cela soit filtré – ce qui était notre cas.
Comme souvent les organismes non-lucratifs américains, le SFI reçoit la plupart de ses financements de donations privées – individus, fondations ou entreprises. L'institut dispose d'un bureau de « strategic partnership » pour collecter des fonds : il se divise en trois secteurs, celui qui s'occupe des bourses fédérales, celui qui s'occupe d'*ACtioN* et celui qui s'occupe des donateurs particuliers. La responsable de ce dernier secteur prend soin de garder les relations avec les donateurs passés ou potentiels, aussi appelés « *patrons* » et « *prospects* » lorsqu'ils dépassent le seuil de 20.000 dollars de donation annuelle[1061]. Elle se présente comme une extension du president du SFI : « in a perfect world, individuals giving in big numbers would love to just be attached to David Krakauer, but he doesn't have time for them. So I am a David Krakauer's extender »[1062]. Ses tâches relèvent du domaine des relations publiques. D'une part elle se charge d'informer les donateurs du contenu scientifique des recherches des scientifiques qu'ils vont rencontrer : « I answer the phone when you call. I sort of function as a complexity consultant. So many of our donors are not scientists and… they really don't like to feel stupid. So I help them sort of be prepared to meet with whoever they're gonna meet »[1063]. D'autre part elle organise tous les trois mois des fêtes privées dans le cadre du « Science club », avant lesquelles les chercheurs et chercheuses qui participeront envoient aux donateurs un ou des articles à lire. Cela évite aux scientifiques de faire une conférence, mais permet aux donateurs de pouvoir engager des conversations avec les membres du SFI. Les donateurs sont encouragés à amener des amis, potentiels donateurs futurs. Un troisième dispositif s'appelle « Satellite program » et consiste dans l'organisation d'un dîner avec une dizaine de *prospects* de manière collatérale à un autre événement, tel qu'un cours dans le cadre d'*ACtioN* : « So I need a room full of ten of those people and then I usually have a faculty member and then I sort of run a conversation like a seller in order to introduce these people to what is complex adaptive system thinking »[1064]. La démarche de marketing, reconnue par notre interlocutrice lorsqu'elle se qualifie de « seller », est, comme dans le cas d'*ACtioN*, soigneusement personnalisée :

> « Well, I mean generally they are people like you, who have the capacity to appreciate what we're doing, which is rare. In their case, they also have the money to fund it. So first, I flatter them lavishly about their capacity to appreciate the work and then I try to understand what their particular interest, their angle is, whether they're interested in cities, whether they're interested in pure math, environmental questions and then I give them all sorts of information about what we're doing and

[1061] Entretien avec anonyme.
[1062] *Ibid*.
[1063] *Ibid*.
[1064] *Ibid*.

again try to, as much as possible, present them with a customized experience with the SFI. Then find something, when I find the sweet spot, when I find the things that excite them the most, then I can say, well this is the kind of program that can benefit for your support »[1065].

Nous avons vu comment la philosophie darwinienne, couplée à la *cité par projet*, est inscrite dans la gestion même du SFI. Comme l'écrit le vice-président de l'institut Bruce Abell dans l'éditorial du bulletin du printemps 1995 : « As organizations age, they often become less agile […] SFI must fight that tendency. […] we should make some efforts to keep it a little unstable to permit intellectual niches to continue to evolve »[1066]. Mais cette recherche d'une *instabilité innovatrice* ou d'une *destruction créatrice*, pour le dire avec Schumpeter, est cependant contredite par plusieurs exemples de chercheurs et de chercheuses qui essayent de rester le plus longtemps possible au sein de l'institut. En même temps, le mode de financement éminemment privé, valorisé pour la liberté qu'il accorderait, est aussi problématique, lorsque la crise de 2008 frappe les financeurs du SFI. Les comptes rendus disponibles sur les bulletins ou sur les rapports annuels par rapport aux dégâts produits par la dernière crise économique sont très parlants :

« Reflecting the sharp market sell-off and general economic decline in 2008, SFI's total revenues were down approximately $2.0M from 2007, largely reflecting decreases in gifts from Trustees and other Individuals, some of which were payments planned for 2008 and delayed into 2009. Taken together, Government and Foundation revenues remained comparable in dollar terms from 2007 to 2008 (approximately $4.5M), but represent a sharply higher fraction of total revenue (48% versus 41%) due to the decrease in gift revenues. Changes in other revenue categories relative to 2007 were relatively small. SFI also incurred an unrealized investment loss in 2008 of approximately $3.2M, which is not reflected in the revenues just discussed. Combined with the reduction in 2008 revenue, the investment loss has strained SFI's financial resources, leading Management and Trustees to implement a significant budget reduction for 2009. The preceding discussion reflects revenues on an as-received basis and therefore excludes pledges made in 2008 but not scheduled for payment until subsequent years »[1067].

Bien que les fonds fédéraux n'aient pas diminués grâce à l'American Recovery and Reinvestment Act[1068] de 2009[1069], cette situation critique a poussé l'institut à des prises

[1065] *Ibid.*
[1066] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 0.
[1067] SFI, *Santa Fe Institute 2008 Annual Report*, 2008, p. 41.
[1068] Une mesure que prit Barack Obama afin de contrebalancer la réduction des financements privés à la recherche que la crise avait produite.

de décisions importantes : « salary freezes and reductions in employee benefits, as well as postponing major capital expenditures »[1070]. La réaction de l'institut fut d'embaucher trois personnes qui s'occupent de différencier les sources de financement sur plusieurs fronts[1071]. Et si le bulletin et le rapport annuel ont toujours été en eux-mêmes des outils de fidélisation et d'expansion du nombre de financeurs, la publicité en 2009 sur ces supports s'intensifie :

> « The Santa Fe Institute receives almost 75% of its income from private sources. If you find value in our Community Lectures, our publications, or our meetings and workshops, we hope that you will consider showing your support by making a gift that is meaningful to you. Your tax deductible gift will make an important difference in the work that we do » [1072].

Les descriptions développées ci-dessous donnent une image assez complète de la gestion interne du SFI. Il reste à inscrire cette forme institutionnelle dans un cadre plus vaste, qui est celui du *régime de production des connaissances* contemporain.
La tension entre le besoin d'une recherche fondamentale et l'injonction marchande à l'« application » des connaissances pour le profit ou pour le progrès de la société, n'est pas uniquement un phénomène concernant le SFI. Dominique Pestre, dans un autre texte que celui sur les *régimes*, l'a relevé également pour ce qui concerne le CNRS en France[1073]. D'après lui, les politiques scientifiques du CNRS semblent être guidées par trois impératifs – la recherche fondamentale, l'interdisciplinarité et la valorisation économique de la recherche – et la tension entre le premier et le troisième est, toujours selon lui, frappante. Pourtant, l'historien suggère qu'il n'y a là rien de surprenant :

> « [L'impératif à la recherche fondamentale] ne doit pas être conçu comme quelque chose d'autonome et de donné […] et qui serait toujours à la base du développement technologique. Dans une économie libérale fondée sur la connaissance […] le fondamental est au centre des pratiques d'innovation mais il n'est pas seul à occuper cette position centrale. Le monde de l'innovation et du développement, pour réussir, demande la conjonction active de plusieurs logiques, leur intégration organique, leur phasage temporel. Le fondamental est aujourd'hui intimement mêlé au technique, à l'instrumental, à l'industriel, au management, à

[1069] Entretien avec Elizabeth Johnson, 28.09.16.
[1070] SFI, *Santa Fe Institute 2008 Annual Report*, 2008, p. 5. « The giving on the part of the board of trustees is tied directly to the stock portfolios, and when those stocks go down, our income goes way down. We had all to take pay cuts. Some people lost their jobs, three or four. We had to cut back online services that were so expensive. Springer journals we don't have any more. We were severely affected from 2008 and we haven't got a rise in the salary since then. That's 8 years » : entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
[1071] Entretien avec Elizabeth Johnson, 28.09.16.
[1072] SFI, *Santa Fe Institute 2009 Annual Report*, 2009, p. 17.
[1073] Pestre, D., « L'évolution des champs de savoir, interdisciplinarité et noyaux durs. Communication au Conseil scientifique du CNRS (13 janvier 2002) », *Natures Sciences Sociétés*, 2004, vol. 12, n. 2, pp. 191-196.

l'existence de capital-risque, aux politiques d'appropriation et de brevets, aux sciences de l'ingénieur […] »[1074].

Pour résoudre cette contradiction, il nous faut développer trois remarques. La première est que le SFI opère un *travail de démarcation*, qui le porte à défendre des aspects différents de son identité et de ses activités, en fonction de l'interlocuteur avec qui il interagit et des objectifs qu'il vise. La deuxième remarque est que tantôt l'organisation interne de l'institut, comme entreprise privée, tantôt les dispositifs (tel le *BusNet*/*ACtioN*) employés pour se rendre utile aux entreprises, en échange du support économique de ces dernières, relèvent plus que d'une *convergence asymétrique* d'une *coïncidence idéologique* entre le monde entrepreneurial, dans et pour lequel agit le SFI, et les théories scientifiques qu'il développe. La troisième remarque concerne la nature et la temporalité du gain. Le SFI, comme d'autres instituts de la complexité dans le monde, produit des plateformes *open source*. Potentiellement en contradiction avec la logique marchande du *régime de production des connaissances* dominant, en réalité ce type de gratuité ne fait que déplacer le gain ailleurs, soit en augmentant la productivité dans les entreprises (comme c'est le cas de *SWARM* ou des algorithmes génétiques chez John Deere), soit en vendant des métadonnées (comme font les GAFAM), soit en livrant du conseil (comme dans le cas de Bios Group), soit en incarnant, comme nous le verrons dans le cas français, un idéal d'utilité publique ou un idéal politique. La démarche du SFI n'est, donc, qu'apparemment contradictoire avec le régime dominant : il en représente simplement une spécification ou une variante.

Conclusion

Nous pouvons maintenant avancer notre réponse à la question qui a ouvert ce chapitre : comment comprendre donc la fondation du SFI et de la « science de la complexité » ? Quels buts poursuivaient les *Senior Fellows* quand fondaient ces deux choses à la fois ? Le massmédiologue Charlie Gere, dans son livre sur les cultures numériques, avance une thèse intéressante :

« The recognition of complexity as an area of research worth funding was explicitly bound up with the emergence of post-Fordist capitalism. The Santa Fe Institute itself was funded by Citibank with the expectation that its research might contribute to the bank's capacity to understand and manage the complexities of globalized capital. […] To some extent complexity theory represents a kind of scientific legitimation of the ideology of neo-liberalism »[1075].

[1074] *Ibid.*, p. 194.
[1075] Gere, C., *Digital Culture*, *op. cit.*, p. 147.

Le PDG de la banque Citigroup, John Reed, est l'un des premiers grands financeurs des projets de recherche du SFI : « It's ironic that with all the physicists in the founding group, the first big money that came in was for economics. The funding came from Citibank : $250,000 to study the global economy »[1076]. C'est à cela que Gere fait référence. Reed cherchait des nouveaux modèles pour appréhender la finance globale et éventuellement éviter de pâtir des pertes comme celles qu'il avait subies peu avant[1077] :

> « Citigroup […] held billions of dollars of bad loans. To address Citigroup's predicament, and to better understand the dynamics of a highly interconnected network of economies, Reed decided that ideas and points of view from beyond neoclassical economics were needed. Perhaps, he thought, the more holistic, yet still rigorous, view of the scientists at the fledgling Santa Fe Institute […] would provide a framework for a deeper understanding »[1078].

Ce n'est pas John Reed qui impulse le SFI vers la « légitimation de l'idéologie du néolibéralisme », pour utiliser la même expression que Gere ; notre thèse est plutôt que les *Senior Fellows* du LANL, après avoir expérimenté le travail de groupe interdisciplinaire et la puissance de l'ordinateur, face au reaganisme montant, se sont proposés de mettre en place les conditions pour la création d'une *mathesis universalis* utile à résoudre les problèmes économiques et géopolitiques dans un monde régi par un nouvel ordre économique. Le SFI a été conçu pour être un lieu où aborder « scientifiquement » les problèmes de la finance, de la guerre, de l'environnement, dans la perspective de maintenir la place hégémonique des États-Unis au niveau planétaire et accompagner l'expansion désentravée du capitalisme libre-échangiste qui va sous le nom de néolibéralisme. Dans des lettres qu'Arthur Spiegel envoya à des donateurs potentiels à l'occasion d'une des premières conférences de présentation du SFI, l'un des arguments qu'il utilisait pour souligner l'importance de l'initiative de l'institut c'est que les *Senior Fellows* craignaient la perte, de la part des États-Unis, de la primauté scientifique au niveau international : « Dr. Cowan and many others in scientific fields feel it can no longer be assumed that the United States will set the pace in the advancement of science and its applications »[1079]. Face à cette crainte, la place, économique et politique, des États-Unis pouvait être gardée, selon les fondateurs du SFI, à condition que les élites industrielles, politiques et intellectuelles du pays se dotent des savoirs et des outils que l'institut s'apprêtait à produire. L'extrait suivant, avec lequel on conclut cet Aparté, fournira une dernière illustration de notre thèse :

[1076] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 9-10.
[1077] « My understanding is that John sat out George, it wasn't the other way round » : entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
[1078] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 27.
[1079] SFI, Lettres d'Arthur Spiegel, boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».

« Working on complex, highly nonlinear systems, for which the behavior of the whole is not simply related to the behavior of the parts, requires the courage to look crudely at a whole situation instead of looking in detail at individual aspects, according to bureaucratic or academic specialties. That requires a revolution in our way of doing things, because we are accustomed to respect highly detailed analysis based on a specialty and not crude synthesis that covers many specialties. Yet top decision makers, such as presidents or kings or CEO's, have to behave as if they have taken into account, however crudely, the interactions among all the different factors affected by their decisions […] A great deal of institutional innovation is required to accommodate such work, and our great research universities, for example, will take a long time to adapt to the need. Some of us have responded by founding a new institution, the Santa Fe Institute […] »[1080].

[1080] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, pp. 13-14.

Chapitre 5 – De la création à la fermeture du CREA, une histoire « pleine de bruit et de fureur »

L'histoire du Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) de l'École Polytechnique de Paris est intéressante pour trois raisons : en soi, vue l'importance de ce petit centre de recherche dans le panorama intellectuel français[1081] ; pour l'histoire des SSC françaises, car c'est l'institution au sein de laquelle l'ISC-PIF a été fondé ; et, tertio, pour montrer l'existence et la forme des tensions et des conflits à l'intérieur des sciences computationnelles ou entre celles-ci et les SHS.

La question historique qui structure ce récit est la suivante : comment est-il possible qu'un centre à l'apogée de sa force institutionnelle, comme le CREA, ait fermé abruptement ses portes en décembre 2012 ? Fondé en 1982 par Jean-Pierre Dupuy et Jean-Marie Domenach, ce laboratoire a cessé ses activités à la fin de 2012 dans des circonstances, pour beaucoup, encore mystérieuses. En 2008, un rapport de l'Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES)[1082] décrit un laboratoire de recherche riche d'associés, de financements et de publications importantes. Cela peut paraître paradoxal qu'un centre de recherche si bien évalué ait pu être dissout du jour au lendemain. Le nombre des membres du CREA et des financements reçus n'avait jamais été aussi important que dans les dernières années de sa vie institutionnelle. L'ancien site Internet du laboratoire avait par ailleurs été complètement refait en avril 2012. Pourquoi alors la disparition soudaine du CREA, seulement huit mois après la refonte de sa vitrine Web, qui donnait l'image d'un laboratoire en pleine forme ? Toutefois, cette question est intimement liée à l'histoire de l'émergence des SSC en France et notamment à la fondation de l'ISC-PIF, que nous racontons dans le chapitre suivant. Les deux chapitres peuvent être vus comme ne faisant qu'un seul corps, car l'on ne peut pas vraiment répondre à la première question sans traiter l'autre. Les destins des ces deux institutions sont en effet intimement liés : au déclin du CREA correspond l'ascension de l'ISC-PIF, puisque d'une certaine manière la fondation de l'ISC-PIF a contribué à produire la disparition du CREA.

Les entretiens et les archives montrent que la crise du CREA n'a pas duré quelques mois mais qu'elle avait en fait commencé quelques années auparavant et qu'elle impliquait un nombre considérable de protagonistes et de controverses profondes. Les données dont nous disposons montrent une situation compliquée, riche de caractéristiques hétérogènes et pleine de paradoxes. Si ce laboratoire sous la tutelle de l'École Polytechnique et du CNRS a fourni à son *spin-off* de la complexité les apports institutionnel, économique et scientifique nécessaires pour démarrer, il a été mis en

[1081] Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*

[1082] AERES, *Rapport du comité d'experts. Unité de recherche : Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) – UMR 7656 de l'École Polytechnique*, février 2008.

crise par l'hypertrophie de son rejeton. En même temps, la disparition du laboratoire fondé par Dupuy et Domenach a forcé l'émule francilien du SFI à chercher une pérennisation ailleurs, qui lui a été conférée par le CNRS. La transformation de GIS en Unité Propre de Service lui a permis une autonomisation et une liberté de mouvement qu'il n'avait pas au sein du CREA. Ceci est, en résumé, le fil qui lie les deux questions que nous nous posons dans ce chapitre et dans le suivant.

Notes méthodologiques et thèse du chapitre

Quelques points méthodologiques doivent être explicités avant de nous plonger dans l'histoire du CREA. Ses vicissitudes sont lestées de protagonistes différents, avec des aspirations et des visions institutionnelles, épistémiques et idéologiques divergentes. Pour reconstruire cette histoire, le support de quelques archives ne pouvait suffire et nous avons eu recours à de nombreux entretiens, menés avec les membres de cette institution entre 2012 et 2017. Il y a bien sûr des limites intrinsèques à une histoire du présent menée par une enquête orale. Dans une interview, le récit historique spontané ne suit pas toujours un cadre chronologique, car le sujet peut mêler les plans temporels, négliger des détails importants ou souligner des détails secondaires. Le problème ne réside pas seulement dans l'inexactitude des souvenirs, due aux émotions ou aux intérêts de la personne interviewée, mais aussi dans le fait que parfois l'interviewé peut raconter des souvenirs d'autres personnes, qu'il a entendus sous forme de récit, ou alors dans le fait qu'il peut réengendrer, comme si c'était une mémoire personnelle, des récits qui sont collectifs, structurés d'une certaine manière pour atteindre des buts stratégiques, ou bien encore il peut se « mettre en scène » en conférant après coup une rationalité à un récit d'événements qui se sont passés de manière chaotique et contingente. Nous avons supplée au manque d'archives par la multiplication des entretiens, avec des figures différentes (directeurs, postdoctorants, administratifs), et par la demande de relecture de ce chapitre de la part de nos interviewés, qui ont ainsi pu contrôler dans leurs archives personnelles l'exactitude des informations ici contenues. La nature polyphonique de notre récit sert aussi à faire jouer les témoignages les uns par rapport aux autres, pour créer de la distance, et faire apparaître des différences et des recoupements.

En deuxième lieu, au vu du caractère contemporain de cette affaire, un impératif déontologique, encore plus qu'épistémologique, s'est imposé à nous. Ceux et celles qui ont accepté de nous relater leurs souvenirs, l'ont fait avec la volonté de figer ces événements dans un récit publique, pour ne pas oublier la vie d'un centre qu'ils et elles ont bien aimé. Ces personnes nous ont livré une part de leurs mémoires récentes aussi avec l'espoir qu'un tel récit puisse rendre compte de toutes les positions en présence. Suivre le principe de symétrie des STS[1083], qui propose de restituer de la même manière l'histoire des « gagnants » et celle des « perdants », nous a paru donc

[1083] Bloor, D., *Knowledge and social imagery*, Londres, University of Chicago Press, 1991.

nécessaire – d'autant que, comme on le verra, il s'agit d'une histoire où il n'y a pas vraiment de « victoire » et de « défaite ». Œuvrer ainsi permet, d'un point de vue déontologique, de ne pas régler les comptes pour quelqu'un d'autre dans une bataille qui n'est pas la nôtre, et, d'un point de vue épistémologique, de reporter les conditions d'existence des positions des uns et des autres, avec le regard charitable de l'anthropologie ou de l'histoire[1084]. Les principes de David Bloor et plus généralement la sensibilité développée par les études des controverses technoscientifiques guident ce chapitre[1085]. La richesse de l'histoire du CREA rappelle d'ailleurs l'histoire, encore plus complexe, que Timothy Mitchell raconte dans un chapitre d'un de ses ouvrages, intitulé « *Can a mosquito speak ?* »[1086]. Le récit du politologue donne le vertige de par l'abondance d'humains et de non-humains impliqués dans les évènements qui portèrent, au milieu de la Deuxième Guerre mondiale, les Anglais à vaincre les Allemands et les Italiens sur le sol égyptien[1087]. Sous la plume de Mitchell, les officiers militaires se mélangent à des digues et à des moustiques, les agriculteurs à des virus et à des chars. Si l'intention du politologue britannique est celle de critiquer l'unidimensionnalité des récits classiques de ce bout d'histoire, qui ne prennent en compte que le facteur humain, nous ne visons pas, comme lui, à enrichir *ad libitum* notre propre récit, avec le risque de le rendre inintelligible. Notre restitution des événements liés au CREA – focalisée sur les humains – n'implique pas l'absence de toute hiérarchisation des causes, comme chez Mitchell. Notre thèse est en effet la suivante : le CREA n'a pas fermé ses portes, parce que s'est terminée une époque intellectuelle, parce qu'il y a eu des disputes d'egos, ou parce qu'il y a eu un différend épistémique déchirant. Ce laboratoire a été dissout parce qu'il y a eu une controverse qu'on peut qualifier de « totale » en référence à Mauss, c'est-à-dire mêlant tous les niveaux (épistémique, humain, institutionnel, politique, économique) dans un tout inextricable. Des affrontements de plusieurs natures se sont mélangés et ont porté la direction du CREA devant les conseils d'administration de l'École Polytechnique et du

[1084] Favret-Saada, J., *Les mots, la mort, les sorts*, Paris, Gallimard, 1977 ; Skinner, Q., *La vérité et l'historien*, Paris, Éditions de l'EHESS, 2012 ; Shapin, S. & Schaffer, S., *Leviathan and the Air-Pump*, *op. cit.*

[1085] Callon, M., « Pour une sociologie des controverses technologiques », *Fundamenta Scientiae*, 1981, vol. 2, n. 3-4, pp. 381-399 ; Bessy, C., Chateauraynaud, F. & Lagrange, P., « Une collection inqualifiable. La controverse archéologique sur l'authenticité de Glozel », *Ethnologie française*, 1993, vol. 23, n. 3, pp. 399-426. Pour des textes introductifs ou des revues de la littérature sur ce domaine, voir : Lascoumes, P., « Chapitre 7. De l'utilité des controverses socio-techniques », *Journal International de Bioéthique*, 2002, vol. 13, n. 2, pp. 68-79 ; Pestre, D., « L'analyse de controverses dans l'étude des sciences depuis trente ans. entre outil méthodologique, garantie de neutralité axiologique et politique », *Mil neuf cent*, 2007, vol. 1, n. 25, pp. 29-43 ; Pinch, T., « Scientific Controversies », dans Wright, J.D. (ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Elsevier, 2015, pp. 281-286.

[1086] Mitchell, T., « Can the mosquito speak? », dans Mitchell, T., *Rule of Experts : Egypt, Techno-Politics, Modernity*, Oakland, University of California Press, 2002, pp. 19-53.

[1087] Pour éviter des malentendus, nous ne faisons pas un parallèle entre le texte de Mitchell et le nôtre parce qu'il s'agirait de deux histoires de guerre, mais simplement parce que ce sont deux histoires très riches. En outre, si ce chapitre se concentre surtout sur les conflits qui ont mené le CREA à la dissolution, l'on n'oublie pas les nombreuses collaborations qui ont caractérisé l'histoire de ce laboratoire et qui ont continué même après sa fin. Petitot en particulier insiste sur la continuité globale, au-delà des tensions locales, des travaux du CREA pendant ses trente ans d'existence : mail de Jean Petitot, 14.09.18.

CNRS, pour décider s'il fallait le reconduire ou l'éliminer. *L'élision est le fait non pas de la « faute » d'un individu, d'un groupe ou d'une institution particuliers, mais d'un dialogue de sourds sur un fond d'anomie au sens durkheimien*.
La crise de 2008-2012 n'a pas été la seule de l'histoire du CREA. Le centre s'était déjà scindé en deux parties au début des années 2000. Si la crise de 2000 a provoqué le départ d'une partie du CREA pour aller fonder une nouvelle institution (l'Institut Nicod), la crise de 2012 a produit la disparition définitive du CREA, faisant peser un risque sur l'existence de l'ISC-PIF. Ce dernier, qui n'est qu'un institut de la complexité parmi d'autres en France, est parvenu à se stabiliser grâce à l'intervention du CNRS qui l'a converti en UPS. Les membres du CREA, quant à eux, ont été réaffectés ailleurs.

Structure du chapitre

Ce chapitre se compose d'une partie consacrée aux débuts du CREA, déjà partiellement couverte par d'autres auteurs, et pour laquelle nous proposons une périodisation ; il se compose ensuite d'une section qui ne cache pas la complexité des variables en jeu et qui s'attèle à respecter le plus possible les récits de nos interviewés ; enfin, une section analytique propose une hiérarchisation des causes qui ont mené à la dissolution du CREA.

La fondation du CREA

Le CREA a été fondé par Jean-Pierre Dupuy et Jean-Marie Domenach en 1982 sous le nom de Centre de Recherche en Epistémologie et Autonomie. Son siège était au 1, rue Descartes pendant la plupart de son histoire, ayant occupé les locaux de l'ENSTA à Balard dans les derniers mois. En 1987 il devient une Unité Mixte de Recherche, avec le support du CNRS, et prend le nom de Centre de Recherche en Epistémologie Appliquée[1088]. L'anthropologue Lucien Scubla nous donne sa définition du CREA, éclairante pour commencer :

> « Le CREA […] qu'est-ce que c'est ? Ce sont des gens qui ont des affinités intellectuelles, qui ont presque tous une double culture, c'est-à-dire qu'ils connaissent un peu les sciences dures, mais ils travaillent sur des sujets qui sont considérés comme un peu plus 'mous', des sciences humaines […]. Et qui sont intéressés par des modèles formels, grâce à leurs backgrounds scientifiques de sciences dures »[1089].

[1088] L'adresse des locaux était 1 rue Descartes, 75005 Paris, mais depuis décembre 2008 il était logé à l'ENSTA, 32 boulevard Victor, 75015 Paris.
[1089] Entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.

C'est surtout sous l'impulsion de Dupuy que ce centre, atypique dans l'ensemble de Polytechnique, a pu se faire. Ce philosophe est à l'origine polytechnicien et ingénieur des mines. Il a au début un parcours de polytechnicien classique : il occupe des charges gouvernementales en tant que conseiller d'État. « J'étais destiné, explique-t-il à l'historien François Dosse, à devenir un haut fonctionnaire ou un capitaine d'industrie »[1090]. Cependant, Dupuy s'intéresse aussi à la philosophie et à l'épistémologie, ce qui l'entraîne dans un parcours d'ingénieur « défroqué »[1091], comme il aime à se définir. Une première rencontre qui lui permit de réaliser sa « conversion » fut celle du philosophe de la physique Jean Ullmo, qui lui conseilla de passer aux sciences humaines tout en gardant un aspect formalisant. Une deuxième rencontre fut pour lui marquante : celle avec Ivan Illich, que lui avait été présenté par son ami Domenach, à l'époque directeur de la revue *Esprit*[1092].

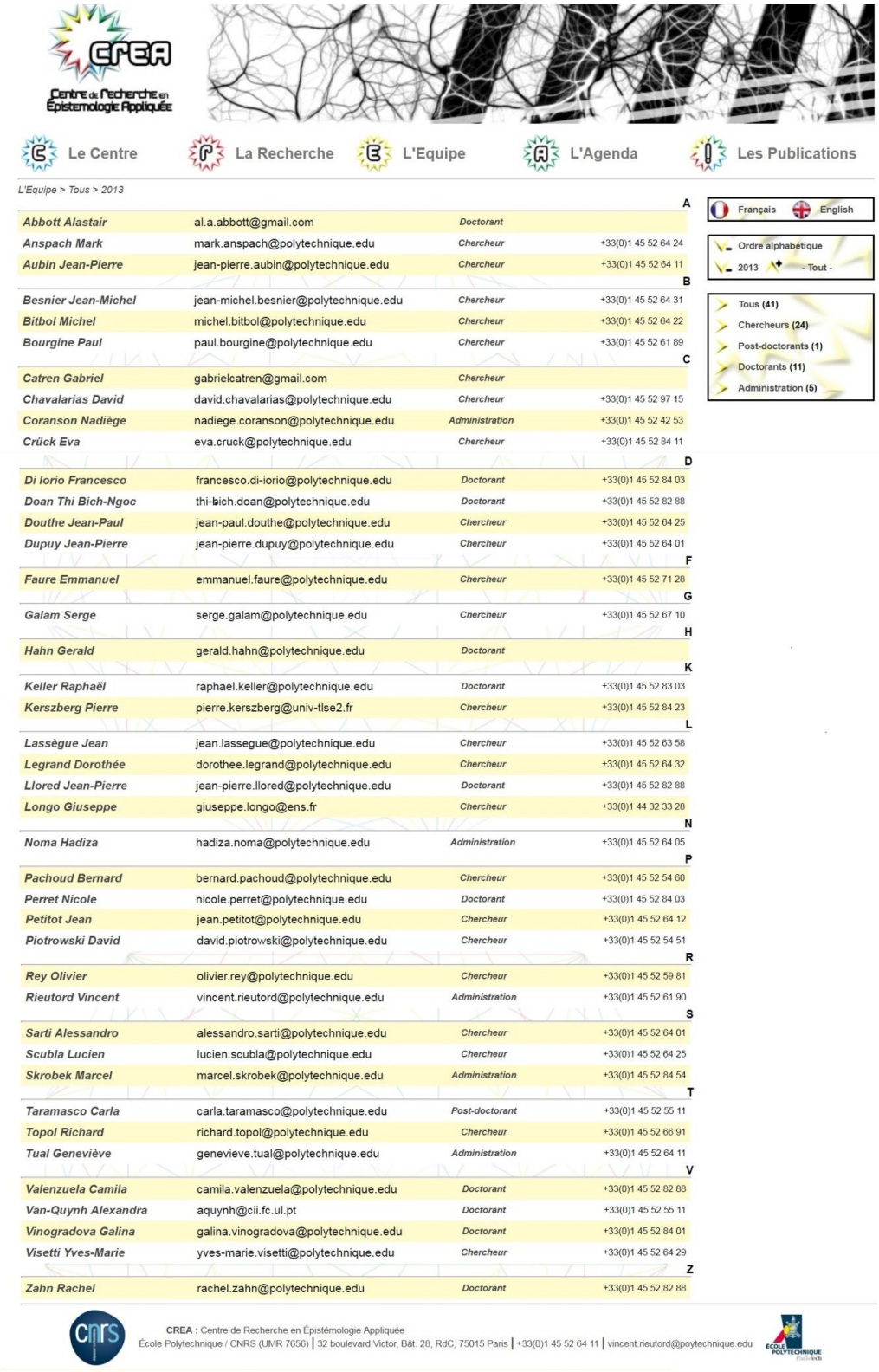
Plus tard, Dupuy dit avoir rencontré Heinz von Foerster au Centro Intercultural de Documentación (CIDOC) d'Illich à Cuernavaca (Mexique) en janvier 1976[1093]. Dupuy connaissait le cybernéticien de réputation, pour son rôle de secrétaire des conférences Macy et pour ses recherches sur les systèmes auto-organisés. Il explique qu'il voyait en lui la possibilité de lier conceptuellement les travaux de René Girard, l'un de ses maîtres-à-penser, aux recherches sur le concept d'auto-organisation de la deuxième cybernétique[1094]. Quand les deux se connaissent au Mexique, von Foerster conseille à Dupuy de rencontrer Henri Atlan et Francisco Varela[1095]. Dupuy rentrera dans la sphère du Groupe des Dix par invitation d'Atlan, où il retrouvera Jacques Attali, ancien camarade du corps des Mines, et peu après conseiller de François Mitterrand. Grâce à ces contacts académico-politiques, les membres du Groupe purent fonder plusieurs institutions.

« Sous l'impulsion de Jean Ullmo, écrit Dupuy, l'École polytechnique[1096] avait décidé de se doter d'un centre de recherches philosophiques, avec une forte composante épistémologique »[1097]. Le CREA est l'une des trois institutions qui sont issues du Groupe des Dix, mais aussi la plus durable et la plus connue[1098].

[1090] Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*, p. 41.
[1091] Dupuy, J.-P., *Ordres et Désordres*, *op. cit.*, p. 16.
[1092] Entretien avec Jean-Pierre Dupuy, 21.11.12.
[1093] Dupuy, J.-P., *Ordres et Désordres*, *op. cit.*, p. 11.
[1094] *Ibidem*, pp. 14-16.
[1095] *Ibidem*, p. 17.
[1096] Le CREA sera le troisième centre de l'École dédié aux sciences humaines, alors que les laboratoires de sciences dures étaient déjà une vingtaine : Lavallée, A., « Penser l'autonomie, penser la connaissance : l'évolution d'un centre de recherche en épistémologie », *Horizons philosophiques*, vol. 2, n. 2, 1992, p. 112.
[1097] Dupuy, J.P., *Aux origines des sciences cognitives*, *op. cit.*, p. 8.
[1098] « On a eu une certaine réputation qu'on s'est faite, d'une part au côté notamment des ethnologues, et d'autre part aussi du côté du grand public. Quand on faisait des séminaires, des manifestations importantes, il y a eu beaucoup de gens qui venaient. Les cahiers du CREA qu'on publiait – on publiait certains de nos séminaires – se vendaient bien, etc. » : entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.

Une périodisation de l'histoire du CREA

Si on décidait de raconter l'histoire du CREA en la périodisant selon les seuls critères des thématiques et des personnes présentes, nous identifierons six époques.


CREA
Centre de Recherche en Épistemologie Appliquée

Le Centre | La Recherche | L'Equipe | L'Agenda | Les Publications

L'Equipe > Tous > 2013

Français | English

Ordre alphabétique
2013 - Tout -

Tous (41)
Chercheurs (24)
Post-doctorants (1)
Doctorants (11)
Administration (5)

A			
Abbott Alastair	al.a.abbott@gmail.com	Doctorant	
Anspach Mark	mark.anspach@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 24
Aubin Jean-Pierre	jean-pierre.aubin@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 11
B			
Besnier Jean-Michel	jean-michel.besnier@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 31
Bitbol Michel	michel.bitbol@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 22
Bourgine Paul	paul.bourgine@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 61 89
C			
Catren Gabriel	gabrielcatren@gmail.com	Chercheur	
Chavalarias David	david.chavalarias@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 97 15
Coranson Nadiège	nadiege.coranson@polytechnique.edu	Administration	+33(0)1 45 52 42 53
Crück Eva	eva.cruck@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 84 11
D			
Di Iorio Francesco	francesco.di-iorio@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 84 03
Doan Thi Bich-Ngoc	thi-bich.doan@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 82 88
Douthe Jean-Paul	jean-paul.douthe@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 25
Dupuy Jean-Pierre	jean-pierre.dupuy@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 01
F			
Faure Emmanuel	emmanuel.faure@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 71 28
G			
Galam Serge	serge.galam@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 67 10
H			
Hahn Gerald	gerald.hahn@polytechnique.edu	Doctorant	
K			
Keller Raphaël	raphael.keller@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 83 03
Kerszberg Pierre	pierre.kerszberg@univ-tlse2.fr	Chercheur	+33(0)1 45 52 84 23
L			
Lassègue Jean	jean.lassegue@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 63 58
Legrand Dorothée	dorothee.legrand@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 32
Llored Jean-Pierre	jean-pierre.llored@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 82 88
Longo Giuseppe	giuseppe.longo@ens.fr	Chercheur	+33(0)1 44 32 33 28
N			
Noma Hadiza	hadiza.noma@polytechnique.edu	Administration	+33(0)1 45 52 64 05
P			
Pachoud Bernard	bernard.pachoud@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 54 60
Perret Nicole	nicole.perret@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 84 03
Petitot Jean	jean.petitot@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 12
Piotrowski David	david.piotrowski@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 54 51
R			
Rey Olivier	olivier.rey@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 59 81
Rieutord Vincent	vincent.rieutord@polytechnique.edu	Administration	+33(0)1 45 52 61 90
S			
Sarti Alessandro	alessandro.sarti@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 01
Scubla Lucien	lucien.scubla@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 25
Skrobek Marcel	marcel.skrobek@polytechnique.edu	Administration	+33(0)1 45 52 84 54
T			
Taramasco Carla	carla.taramasco@polytechnique.edu	Post-doctorant	+33(0)1 45 52 55 11
Topol Richard	richard.topol@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 66 91
Tual Geneviève	genevieve.tual@polytechnique.edu	Administration	+33(0)1 45 52 64 11
V			
Valenzuela Camila	camila.valenzuela@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 82 88
Van-Quynh Alexandra	aquynh@cii.fc.ul.pt	Doctorant	+33(0)1 45 52 55 11
Vinogradova Galina	galina.vinogradova@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 84 01
Visetti Yves-Marie	yves-marie.visetti@polytechnique.edu	Chercheur	+33(0)1 45 52 64 29
Z			
Zahn Rachel	rachel.zahn@polytechnique.edu	Doctorant	+33(0)1 45 52 82 88

CREA : Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée
École Polytechnique / CNRS (UMR 7656) | 32 boulevard Victor, Bât. 28, RdC, 75015 Paris | +33(0)1 45 52 64 11 | vincent.rieutord@poytechnique.edu

Figure 3. Membres du CREA avant sa fermeture

- La première époque pourrait être nommée *cybernétique et auto-organisation*. Elle va de 1982 à 1986. Le laboratoire se compose de peu de membres, surtout des humanistes, et les discussions portent sur les thématiques traitées par le Groupe des Dix : première et deuxième cybernétique, complexité, auto-organisation, holisme.
- La deuxième époque *sciences cognitives et philosophie analytique* couvre les années de 1987 à 2000. Elle se caractérise par l'arrivée d'un groupe de cognitivistes et de philosophes analytiques guidé par Daniel Andler.
- La troisième est *une phase de transition*, de 2000 à 2002. C'est une transition entre deux visions des sciences cognitives, liées à des personnes différentes. Pendant cette période, le mathématicien et philosophe Jean Petitot est le directeur du CREA et ne cache pas son opposition à l'approche analytique en sciences cognitives. Deux ans de luttes aboutissent au départ du pôle analytique du CREA et à la fondation de l'Institut Jean Nicod sous l'aile du CNRS.
- La quatrième phase *sciences cognitives, morphogenèse et phénoménologie* couvre les années de 2002 à 2006. Jean Petitot est encore le directeur. Il réunit autour de lui des chercheurs et des chercheuses divers, avec le projet explicite de développer les modèles dynamiques morphologiques et de naturaliser la phénoménologie à travers les neurosciences.
- La prise de la relève de la direction du CREA par Paul Bourgine marque une cinquième phase, *modélisation et systèmes complexes*, qui couvre les années de 2006 à 2010. Pendant cette phase, la composante philosophique du centre est de plus en plus marginalisée du fait du nombre croissant des membres et des financements amenés par Bourgine.
- La sixième phase, de 2010 à 2012, pourrait être considérée comme une sous-phase de la cinquième d'un point de vue thématique, mais non pas d'un point de vue administratif. Elle se caractérise par les conflits qui l'ont mené à la fermeture. En 2010 Bourgine prend sa retraite, laissant la direction à des intérimaires, jusqu'à la dissolution du centre[1099].

Si les trois dernières phases nous occupent dans la deuxième et troisième section, les trois premières seront racontées ici.

Qu'est-ce que le CREA ?

Il existe un consensus général autour de l'évènement fondateur du CREA : le colloque organisé par Dupuy et Dumouchel intitulé *L'auto-organisation. Du physique au politique*[1100]. Comme le rappelle Petitot, à la base de ce colloque et donc du CREA, il y avait « cette conviction qu'il existe des modèles d'organisation communs à des

[1099] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
[1100] Dumouchel, P. & Dupuy, J.-P., (ed.), *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Paris, Seuil, 1983.

domaines complètement différents »[1101]. Le linguiste David Piotrowoski synthétise les deux âmes du CREA comme « une osmose entre ce qui est de l'interprétatif et du déterminatif »[1102]. En lisant les titres des vingt-et-un cahiers du CREA (encadré 11), parus de 1982 à 2005[1103], il est possible de remarquer l'évolution des thématiques. Jusqu'au numéro 6, l'on songe à appliquer les théories cybernétiques et de l'autopoïèse à la philosophie politique, à l'épistémologie et à la logique. Les numéros 7 et 8 contiennent des contributions à caractère historique sur la cybernétique de premier et second ordre, sur le groupe de Prigogine, ainsi que sur les théories d'Atlan et de Varela. Les premières versions[1104] des livres de l'historien américain Steve Heims[1105] et de Dupuy[1106] sur la cybernétique y sont contenues. À partir du numéro 9 les sciences cognitives deviennent l'argument pivot, par le biais duquel les autres thèmes de recherche du centre sont abordés.

Encadré 11. Titres des 21 Cahiers du CREA	*Numéro et date*
Modèles formels de la philosophie sociale et politique	n. 1, octobre 1982
Reproductions et ruptures culturelles ; études girardiennes ; systèmes à auto-organisation	n. 2, mai 1983
L'émergence des normes ; acteurs et institutions culturels	n. 3, mai 1984
Le libéralisme et la question de la justice sociale	n. 4, septembre 1984
Travaux d'épistémologie générale	n. 5, juin 1985
Logiques de la réciprocité	n. 6, septembre 1985
Histoires de cybernétique	n. 7, novembre 1985
Généalogies de l'auto-organisation	n. 8, novembre 1985
Cognition et complexité	n. 9, mars 1986
Sciences cognitives et sciences sociales	n. 10, décembre 1986
Sciences cognitives et sciences économiques	n. 11, avril 1988
Structures et temporalités	n. 12, décembre 1988
Marchés, normes, conventions	n. 13, septembre 1989
Méthodologie de la science empirique	n. 14, juin 1990
Méthodologie de la science empirique, 2	n. 15, décembre 1992
Épistémologie et anthropologie ; autoréférence, identité et altérité	n. 16, février 1994
Leçons d'épistémologie	n. 17, décembre 1997
Référendum et Démocratie	n. 18, janvier 1999

[1101] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1102] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1103] Ensuite le CREA a continué à produire des documents internes : entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
[1104] Heims, S., « An Encounter Between Neo-mechanists and the Human Sciences », Cahier du CREA, n. 7, 1985, pp. 141-202 ; Dupuy, J.P., « L'essor de la première cybernétique (1943-1953) », Cahier du CREA, n. 7, 1985, pp. 7-139.
[1105] Heims, S., *The Cybernetics Group*, *op. cit.*
[1106] Dupuy, J.-P., *Aux origines*, *op. cit.*

La Théorie Politico-Constitutionnelle du Gouvernement d'Exception	n. 19, mai 2000
Une approche formelle de la typicité	n. 20, janvier 2005
Du sens en langue : aspects neurobiologiques, structuraux et phénoménologiques	n. 21, décembre 2005

Dans la première phase, les membres permanents étaient une dizaine : notamment les fondateurs et les membres d'un groupe financé par le CNRS pour étudier *La généalogie de l'auto-organisation*[1107]. Elle fut menée par une équipe, dirigée par les philosophes Isabelle Stengers et Pierre Livet, comprenant Dupuy et Pierre Lévy[1108], et, en tant qu'hôtes, Steve Heims, Henri Atlan et Francisco Varela.

Pendant l'époque cognitiviste et analytique, le CREA s'est transformé en centre pionnier des sciences cognitives, l'un des plus importants d'Europe[1109]. Comment s'est accomplie une telle mutation ? Dupuy explique s'être intéressé à la logique « sans vraiment avoir de formation dans ce domaine »[1110]. Un jour il décide d'organiser au CREA un cours intensif de trois ans tenu par des logiciens, parmi lesquels Daniel Andler. Celui-ci deviendra membre du CREA en 1984 et, selon les historiens, se transformera en « fédérateur » du centre[1111]. Après lui, rejoignent le laboratoire une dizaine de nouveaux chercheurs et chercheuses : Varela et Petitot en 1986, l'anthropologue Dan Sperber, les philosophes François Récanati et Pierre Jacob en 1988. Ces trois derniers étaient des amis d'Andler, avec lequel ils participaient au « groupe du vendredi », un groupe informel qui discutait de sciences cognitives dans un cadre analytique. Ensuite arrivèrent Joëlle Proust en 1989 et Pascal Engel en 1990, le philosophe Alain Boyer, les économistes Laurent Thévenot et Olivier Favereau. Les sciences cognitives deviennent graduellement l'axe principal du centre, le thème de l'auto-organisation au sens cybernétique est marginalisé, alors que se développe l'axe de la philosophie sociale, morale et politique.

En 1987, le CREA devient une UMR Polytechnique-CNRS et à cette occasion la signification de la dernière lettre de l'intitulé change : la direction décide de mettre au second plan le concept varélien d'autonomie, pour pousser davantage l'application de la formalisation modélisatrice aux sciences cognitives et sociales. En 1989, le CREA devient l'un des chefs de file institutionnels dans l'organisation du premier doctorat en sciences cognitives de France. « L'originalité du CREA, écrit Dupuy, dans notre pays et même sans doute dans le monde, tient à ce que s'y côtoient et s'y confrontent des

[1107] Stengers, I., « Les généalogies de l'auto-organisation », *op. cit.*

[1108] À la fin des années 1970, Pierre Lévy, disciple de Michel Serres, se tourne vers Castoriadis quand Serres s'absente pour aller à San Diego. Au séminaire de Castoriadis, Lévy rencontre Dupuy, qui l'invite à faire partie du groupe STS dédié à l'étude de l'auto-organisation : Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*, pp. 37-39.

[1109] Chamak, B., « The Emergence of Cognitive Science in France : A Comparison with the USA », *Social Studies of Science*, vol. 29, n. 5, 1999, p. 662.

[1110] Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*, p. 46.

[1111] *Ibid.*, p. 41 ; Feuerhahn, W., « Un tournant neurocognitiviste en phénoménologie ? », *op. cit.*, p. 76.

démarches et des paradigmes très variés »[1112]. À part le rapprochement que l'on peut faire entre cette rhétorique pluraliste et interdisciplinaire et la rhétorique analogue tenue à la même époque par le SFI, nous pouvons remarquer que c'est précisément cette diversité socio-épistémique qui sera l'une des causes de la dissolution du CREA. Avant d'en arriver là, au début des années 2000 une première crise institutionnelle conduit une partie des membres du laboratoire à l'abandonner, pour fonder leur maison ailleurs. Jusque-là opposés, les paradigmes et les approches en présence sont très divers, comme le dit Dupuy : en effet, les varéliens se définissent comme des holistes antiréductionnistes, tandis que les cognitivistes autour d'Andler se voient comme des analytiques rigoureux, qui veulent scientifiser les SHS. Mais les premiers taxent les seconds de réductionnisme, tandis que les seconds taxent les premiers d'antiscientisme métaphysique. C'est à partir de 1988 que commencent à paraître des tensions entre factions différentes à l'intérieur du CREA. À cette époque, Dupuy craint que l'attitude selon lui englobante, naturaliste et réductionniste des sciences cognitives aplatisse le niveau social sur le niveau biologique. Il témoignera à Dosse de sa satisfaction face au fait que ce domaine trouve sa place au CREA, mais qu'il craignait une tendance « à tout envahir, y compris la théorie de l'action, la philosophie de l'action, le normatif »[1113].

L'émergence des premiers clivages

Au début des années 1990, Petitot, Varela et d'autres membres associés au CREA, Jean-Michel Roy et Bernard Pachoud, inaugurent un projet de neurophénoménologie qui, en reprenant la tradition allemande et française de Husserl et Merleau-Ponty, vise à la renouveler, en la « naturalisant » par le biais des mathématiques, de la biologie, de la psychologie et de la computation. « Dans ce groupe, nous a raconté le linguiste Yves-Marie Visetti, le mot complexe n'y figurait pas, c'était le mot 'modélisation' et le côté topologique et dynamique qui comptaient beaucoup »[1114]. Quant à Varela, porteur de la « théorie de l'enaction »[1115], il espérait trouver pour son projet intellectuel un accueil plus positif en France que dans le monde anglo-saxon, mais il fut déçu : si les phénoménologues refusaient ce projet, « ayant retenu de leurs lectures husserliennes l'anti-naturalisme comme un principe cardinal »[1116], les philosophes analytiques d'autre part le considéraient comme relevant d'une approche spiritualiste. En 1990, puisque Dupuy craint la rupture totale entre les deux équipes – approches cognitives du social et groupe de recherche sur la cognition – il se préoccupe de les fusionner : la philosophie assurera selon lui la jonction nécessaire. Au cours de cette décennie, toutefois, Dupuy intervient plusieurs fois dans la réorganisation du centre

[1112] Dupuy, J.P., *Aux origines des sciences cognitives*, *op. cit.*, p. 9.
[1113] Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*, p. 241.
[1114] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1115] Varela, F., *Invitation aux sciences cognitives*, Paris, Seuil, 1996.
[1116] *Ibid.*, p. 66.

pour éviter que les groupes de l'auto-organisation et de la philosophie sociale, morale et politique soient marginalisés. Dix ans après sa fondation, le CREA est composé d'environ vingt chercheurs et chercheuses fixes, dix invités et dix stagiaires[1117] ; les deux âmes qui le composent se disputent tout en cohabitant.
En 1999, Dupuy passe la relève de la Direction à Daniel Andler[1118], qui démissionne à la fin de la même année pour quitter le CREA dans l'année 2000[1119]. (Après cela, Dupuy sera directeur à intérim en attendant la prise des fonctions de Petitot). Lors de la présentation d'un nouveau projet pour le renouvellement des tutelles de la part du CNRS et de l'École Polytechnique, selon le philosophe Jean Lassègue « il y a eu une espèce de guerre à l'intérieur de la communauté de la philosophie analytique »[1120] : « plusieurs personnes [Récanati, Proust] ont présenté un projet rival à celui d'Andler, à l'intérieur de son propre camp [cognitiviste] »[1121]. Andler dément Lassègue :

> « il n'y a pas eu de projet concurrent du mien, nous étions juste à un an de mon élection (1998) et tout roulait… Le conflit ne portait pas sur l'orientation scientifique, au contraire, le reproche qui m'avait été fait en 1998 c'était d'être trop 'coulant' sur le plan scientifique, de ne *pas* donner une orientation très forte comme le voulait Petitot »[1122].

La controverse mêla des considérations d'ordre épistémique à des mécontentements d'ordre politico-institutionnel : Scubla relate qu'Andler avait installé un « régime militaire »[1123], avec des notes de service tous les jours, qui déterminaient quels membres pouvaient venir quels jours. Andler tient à nier ce point : « je n'ai évidemment jamais *interdit* à qui que ce soit de venir au CREA certains jours. J'ai proposé que vu le fait qu'on était trois, quatre, cinq par bureau, on pourrait s'organiser sur une base de time-sharing volontaire »[1124]. Selon Scubla, « [l]es propres amis [d'Andler], ceux qui [avaient] voté pour lui, ont fini par faire un putsch »[1125], ce qui aurait produit les démissions d'Andler et l'intervention des tutelles. Il y eut ensuite de nouvelles élections et, d'après Lassègue, « c'est Petitot qui a gagné, parce que son projet a été bien reçu par Polytechnique et par les trois commissions du CNRS pour lesquelles le CREA était concerné, c'est-à-dire sciences du langage, philosophie et sciences cognitives »[1126]. L'idée de Dupuy de faire collaborer les

[1117] Lavallée, A., « Penser l'autonomie, penser la connaissance », *op. cit.*, pp. 124-127 ; Dosse, F., *L'empire du sens*, *op. cit.*, pp. 233-234.
[1118] Feuerhahn, W., « Un tournant neurocognitiviste en phénoménologie ? », *op. cit.*, p. 76.
[1119] Mail de Daniel Andler, 22.03.18.
[1120] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1121] *Ibid.*
[1122] Mail de Daniel Andler, 22.03.18.
[1123] Entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.
[1124] Mail de Daniel Andler, 22.03.18.
[1125] Entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.
[1126] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

neurophénoménologues et les philosophes analytiques sur la base d'un projet commun de naturalisation de l'esprit se révélera un échec. L'épilogue, après que le CREA a risqué une première fois de disparaître[1127], fut la migration du pôle analytique vers l'Institut Jean Nicod (CNRS, EHESS, ENS) créé en 2002[1128]. Jean-Michel Besnier, qui à l'époque avait été invité par les fondateurs du laboratoire afin d'essayer de réconcilier les deux âmes du CREA, explique les raisons de cet échec selon son point de vue :

> « Les petits copains cognitivistes étaient infréquentables. Si j'étais très proche de Joëlle Proust qui était une amie, c'était très difficile de discuter avec les autres. Les soupçons portaient sur le réductionnisme, ils ne voyaient pas en quoi c'était embêtant. Les problématiques existentielles sur l'humain ça ne les intéressait pas. Eux ils faisaient de la science, François Récanati me disait, 'Quand est-ce que tu vas te mettre à faire un peu de science ?'. Ils étaient physicalistes […] Ils avaient beaucoup d'estime pour moi mais ils avaient l'impression que je me fourvoyais dans de faux problèmes, les problèmes herméneutiques etc. […] [Pour eux] [l]a métaphysique est une imposture et tout est une affaire de langage, et tous les problèmes métaphysiques doivent pouvoir se réduire à des problèmes de syntaxe, c'est tout. Sortis de là il n'y avait rien à faire »[1129].

Lucien Scubla, dès le début critique face à l'intégration des cognitivistes dans le CREA, utilise la métaphore du coucou :

> « les anciens et les nouveaux cohabitaient sans plus. C'est-à-dire que les nouveaux nous accueillaient très volontiers à leurs séminaires, mais si nous organisions quelque chose [ils ne venaient pas] […] c'est plutôt la stratégie du coucou si vous voulez. Le coucou c'est l'oiseau qui rentre dans le nid des autres oiseaux […] quand Dupuy a voulu abandonner la charge très lourde de direction, c'est Daniel Andler

[1127] Selon Dupuy, l'affrontement entre analytiques et phénoménologues représente « une pomme de discorde qui aurait pu aboutir à la disparition du CREA dès l'an 2000. Il faut comprendre que le choc de Titans qui faillit tout emporter est celui qui oppose les deux principaux courants de la philosophie contemporaine : la philosophie analytique, d'un côté, la phénoménologie husserlienne de l'autre. Il faut comprendre aussi que les sciences cognitives ne furent, dans cette affaire, du moins au début, qu'un 'hareng rouge', comme disent les Québécois. Le 'groupe de Daniel Andler', comme ils s'appelèrent au début, comprenait certains des meilleurs représentants de la philosophie analytique en France : outre Daniel, François Récanati, Pierre Jacob, Dan Sperber, Joëlle Proust, Roberto Casati, etc. Ils ne s'en sont jamais cachés : leur but était de faire de la philosophie analytique la philosophie dominante en France. Ils poursuivent aujourd'hui brillamment ce but au sein de l'ENS, dans le centre extrêmement actif qu'ils y ont créé ; l'Institut Jean Nicod. Or ils se rendaient bien compte que ce combat ne pouvait que laisser l'X indifférente. Les sciences cognitives furent donc le cheval de Troie qui leur permit de le faire entrer sur la Montagne Sainte Geneviève et le plateau de Palaiseau. Pourquoi les sciences cognitives ? Parce que le paradigme dominant est tout entier informé par la philosophie analytique du langage et de l'esprit » : mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18.

[1128] Feuerhahn, W., « Un tournant neurocognitiviste en phénoménologie ? », *op. cit.*, p. 69.

[1129] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.

qui lui a succédé […] Et Andler, tout de suite lui il était prêt à éliminer les anciens. Il était gêné par un CREA qui n'était pas monocolore »[1130].

En 2000, après une courte période où Dupuy fut directeur par intérim, Petitot fut élu et bien accepté par les tutelles du fait de sa double casquette de scientifique et d'humaniste.

La phase dominée par Jean Petitot

Mathématicien et philosophe au Centre d'Analyse et des Mathématiques Sociales (CAMS) de l'EHESS, Petitot avait permis aux philosophes non seulement d'avoir leur place au sein du CREA, mais aussi d'accroitre leur nombre. Il avait suivi les travaux de la première période du CREA, tout en travaillant depuis les années 1970 à côté de, et sur René Thom, un de ses maîtres en mathématiques et philosophie[1131]. Puisque, comme il le dit, « ce qu'avait proposé Thom était en fait une composante d'un mouvement scientifique beaucoup plus large, celui qui d'utiliser les mathématiques des systèmes dynamiques pour modéliser les phénomènes morphologiques en général », Petitot s'était intéressé à ce que faisaient Prigogine, Haken et Atlan, « avec un enthousiasme concernant le fait qu'on pouvait utiliser des mathématiques très solides pour expliquer des phénomènes qui relèvent de la structuration, de l'organisation, de la morphogenèse »[1132]. Si, au milieu des années 1980, Petitot se penche sur l'étude de la perception visuelle, c'est en 1986 qu'il rentre officiellement au CREA, en y travaillant à mi-temps à côté du groupe d'Andler. Avec celui-ci Petitot participait à l'organisation du DEA en sciences cognitives crée par Michel Imbert qui avait comme tutelles l'École Polytechnique, l'EHESS et l'Université Pierre et Marie Curie[1133]. Petitot explique avoir travaillé de plus en plus au CREA. En 1995, Paul Bourgine – qui a une thèse en économie dynamique et cognitive et une HDR en sciences cognitives[1134] – quitte le Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) et rejoint Petitot au CREA : les deux s'étaient connus en 1965 à l'École Polytechnique, où ils partageaient le même casert[1135] et, avec leurs camarades, discutaient tous les soirs de sciences et

[1130] Entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.
[1131] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1132] *Ibid.*
[1133] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1134] « [J]e l'ai fait avec Jean-Louis Le Moigne. Un jour je me dis, cela ne va pas bien, il faut mélanger cela avec les sciences cognitives. Et j'avais un peu peur qu'il me dise : bon, tu t'occupes de faire ta thèse d'économie et puis les sciences cognitives sera après. Et il saute de joie parce qu'il adorait [Herbert] Simon et donc ensuite je suis plutôt parti du côté sciences cognitives tout en prenant les aspects plutôt formels, donc en regardant bien les systèmes experts, la logique. Puis après en 1985 […] est arrivé le renouveau des réseaux neuronaux artificiels » : entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17. Bourgine relate aussi avoir été influencé tôt par le Groupe des Dix, notamment par Rocard et Attali, par Cornélius Castoriadis, Claude Lefort et Edgar Morin, par Herbert Simon (invité par Le Moigne à Aix-en-Provence), ainsi que par le rapport du Club de Rome, *Limits to Growth*. Bourgine a été un activiste politique, surtout lors de sa militance à la Quatrième internationale.
[1135] Des chambrées de six élèves.

d'humanités[1136]. Ils ne s'étaient croisés que rarement depuis cette époque. Comme nous le verrons, Bourgine est un militant des SSC de longue date et des plus aguerris. D'où provient une telle conviction dans le bien fondé et dans l'utilité des SSC ? Selon Piotrowski, c'est lié à sa « fascination pour la puissance calculatoire, la puissance de rendement, mi-scientifique mi-technique, que les systèmes complexes délivraient »[1137]. Selon Visetti, Bourgine voulait fonder « la troisième ou quatrième cybernétique »[1138], ce qui lui permettait, d'après Piotrowski, de se voir « à cheval entre un penseur et un ingénieur, quelqu'un qui réalise une prouesse technique »[1139]. D'autres attribuent des raisons psychologisantes pour justifier de l'enthousiasme de Bourgine. Quant à lui, il voit les SSC comme la « science du XXI^{ème} siècle »[1140], capable de poser les jalons épistémologiques et techniques pour un « nouveau siècle des Lumières »[1141]. Nous aurons l'occasion d'approfondir ses argumentations par la suite.

Lorsque Petitot devient le directeur du CREA, il s'installe à temps plein à l'École Polytechnique, en devenant membre de son corps professoral, toujours dans le cadre du DEA de sciences cognitives[1142]. Petitot et Bourgine commencent à associer au laboratoire un certain nombre de personnes, dont les physiciens de l'École Normale Supérieure, Gérard Weisbuch et Jean Pierre Nadal, autour de l'étude des systèmes complexes. Sur requête de Dupuy, le groupe Polytechnique-ENS crée une antenne du CREA à Palaiseau, où Petitot et Bourgine suivent jusqu'à une douzaine de doctorants entre 1996 et 2000[1143]. Arrivent ensuite le physicien et informaticien René Doursat, rentré des États-Unis, les philosophes David Piotrowski, Jean Lassègue, Yves-Marie Visetti, « parce qu'ils avaient beaucoup travaillé sur la théorie des catastrophes et sur la linguistique », puis des ex-doctorants de Petitot et Bourgine, comme Pierre Sorel et David Chavalarias[1144]. Il y avait d'autres nouveaux membres, comme le philosophe de la physique Michel Bitbol, qui était ensuite passé au pôle cognitiviste du fait de son intérêt pour Varela, ou Jean-Michel Roy, chercheur à l'ENS Ulm qui s'intéressait à la fois à la phénoménologie et à la philosophie analytique[1145]. « Donc assez vite, explique Petitot, il s'est formé un pôle modélisation, un pôle plutôt philosophique et puis un petit groupe de phénoménologie[1146] ». D'après Lassègue, Visetti et Piotrowski, les six ans de direction de Petitot ont été « féconds ». Malgré les divergences entre les trois

[1136] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1137] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1138] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1139] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1140] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1141] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1142] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1143] *Ibid.*
[1144] *Ibid.*
[1145] *Ibid.*
[1146] Ce groupe a participé à un grand colloque organisé à Bordeaux par Jean Michel Roy, co-organisateur avec Petitot, Varela et Pachoud du séminaire de phénoménologie du CREA : Petitot, J., Varela, F., Pachoud, B. & Roy, J.-M., *Naturalizing phenomenology. Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science*, Stanford, Stanford University Press, 2000.

groupes du CREA, tous nos interviewés qualifient cette période de pacifique et fructueuse : « ça fait un paysage intellectuel très agréable de la décennie 2000-2010 »[1147], une période « très enrichissante, très agréable, amicale »[1148], ou encore « détendue, conviviale et intense »[1149]. Cela grâce notamment à la capacité de Petitot d'être « à même de composer avec tout ça »[1150].

En 2006, Petitot relate s'être mis en retrait pour se consacrer pleinement à ses recherches personnelles qu'il avait dû sacrifier pour s'occuper du Centre[1151]. Lors d'assemblées générales, il explique avoir proposé que Bourgine lui succède comme directeur, lui-même restant quelque temps directeur adjoint pour assurer la transition. Il renonce aussi à la direction du DEA de sciences cognitives, qu'il dirigeait depuis 2000 à la suite de Michel Imbert, et propose Michel De Glas comme successeur. À partir de ce moment-là, il soutient ne plus avoir été impliqué dans la politique scientifique du CREA. Il garde sa chaire de professeur de sciences cognitives à l'École Polytechnique jusqu'en 2009, année de son départ à la retraite à 65 ans.

Le début de la fin

En 2001 le centre subit le dernier réaménagement de son histoire, devenant un « laboratoire polyscientifique de sciences cognitives théoriques »[1152]. À cette époque, les thèmes de recherche du CREA se divisent en quatre axes : la modélisation des systèmes cognitifs, l'épistémologie des systèmes cognitifs, la modélisation des systèmes complexes et l'épistémologie des systèmes complexes[1153]. Sur le site internet, on pouvait lire que l'approche était interdisciplinaire parce que c'était une caractéristique « intrinsèque et endogène » des objets d'étude en question, résultat d'un mélange des niveaux physique, biochimique, neuronal et social[1154].

En 2008, le rapport d'un comité d'experts de l'AERES relève :

- 15 chercheurs (dont 6 enseignants-chercheurs et 9 chercheurs),
- 3 ingénieurs,
- 13 doctorants,
- 3 techniciens,
- 5 administratifs

[1147] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1148] *Ibid.*
[1149] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1150] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1151] Mail de Jean Petitot, 14.09.18.
[1152] https://web.archive.org/web/20131215043940/http://www.crea.polytechnique.fr/index.php?page=centre&sspage=presentation&lang=fr&tri=up&annee=2013.
[1153] Petitot, responsable du Rapport d'activités, insiste sur le dédoublement du concept de modélisation entre une modélisation qualitative plus philosophique à la Thom et une modélisation computationnelle plus opérationnelle. La morphodynamique thomienne inspirant les travaux de Petitot et d'autres membres du CREA ne relève pas du paradigme computationnel des SSC : mail de Jean Petitot, 17.10.18.
[1154] *Ibid.*

- et 2 membres externes[1155].

Au moment de sa fermeture, en 2012, le CREA affiche sur son site :

- 24 chercheurs
- 11 doctorants,
- 5 chercheurs
- 1 post-doctorant
- et 5 administratifs[1156].

Pourquoi un centre si bien noté et en évidente croissance a dû soudainement fermer ses portes ? La sous-section suivante explore la myriade de « causes » qui, selon nos interviewés, ont produit l'explosion du CREA.

L'implosion du CREA

En dépit de la refonte complète de son site Internet, mis à jour le 13 avril 2012, le CREA a officiellement fermé ses portes le 31 décembre 2012. À la fin de son activité, le laboratoire collaborait avec plusieurs centres de recherche tant en France qu'à l'étranger[1157]. Ses membres se disaient enthousiastes : par exemple, le mathématicien Alessandro Sarti qualifie ce laboratoire d'« endroit le plus beau au monde, depuis toujours », en motivant son affirmation avec la liste des associés les plus intéressants pour lui ; aussi, Sarti définit le CREA comme « plus intéressant que Berkeley » – où il avait passé une période postdoctorale de trois ans –, car le premier serait un « lieu de connaissance », tandis que le second serait seulement un « lieu de compétences »[1158]. Selon Fausto Fraisopi, ancien postdoctorant du CREA, ce laboratoire « était le seul endroit où l'on pensait » et sa fermeture a représenté « une grande perte pour l'épistémologie française »[1159]. Face à la fermeture de l'UMR, Sarti rappelle : « Tous étaient incrédules face au fait que le CREA était fini »[1160]. Bourgine, dans un des entretiens qu'il nous a accord a répété plusieurs fois le terme « gâchis » par rapport à cette fermeture, en le qualifiant parfois de « gros », parfois de « monstre »[1161].

[1155] AERES, *Rapport du comité d'experts. Unité de recherche : Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) – UMR 7656 de l'École Polytechnique*, février 2008.

[1156] https://web.archive.org/web/20131215040850/http://www.crea.polytechnique.fr/index.php?page=equipe&lang=fr.

[1157] https://web.archive.org/web/20131215043952/http://www.crea.polytechnique.fr/index.php?page=centre&sspage=partenariats&lang=fr&tri=up&annee=2013.

[1158] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

[1159] Entretien avec Fausto Fraisopi, 29.01.16.

[1160] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

[1161] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.

Les affects

Plusieurs de nos interviewés ont tenu à souligner leur implication au niveau affectif dans cet affrontement entre factions qui n'a cessé de s'accentuer au cours des dernières années du CREA. Les phrases à caractère émotif que nous venons de mentionner se complètent de témoignages d'épisodes de forte tension, de disputes violentes, de souffrance et de rage, doublées d'insomnies. Ce qui confirme une remarque de François Dosse à propos du poids non négligeable des rapports d'amitié et d'inimitié dans le monde intellectuel et scientifique[1162]. Quand nous avons interviewé Dupuy en 2012, il définit l'affaire du CREA de façon shakespearienne comme une histoire « pleine de bruit et de fureur »[1163]. Son refus de nous parler du laboratoire qu'il avait contribué à fonder, en partie dû à son éloignement des affaires le concernant[1164], est indicatif de l'importance des implications en termes d'affects que la fermeture du laboratoire avait entraînées sur ses membres : il nous enverra un mail détaillé pour nous permettre d'intégrer son point de vue à ce chapitre en 2018, après avoir reçu une première version du manuscrit. Lassègue, qui sur proposition de Petitot fut nommé directeur adjoint du CREA, nous a confié la difficulté de nous parler d'événements si conflictuels. Il n'aurait peut-être pas accepté de nous en parler, si nous l'avions interpellé ne serait-ce qu'un an plus tôt. Sarti reporte que « personne ne dormait » et que certains affrontements arrivaient aux cris et aux insultes réciproques[1165]. Selon lui, le bouleversement des membres permanents était dû au fait qu'ils étaient préoccupés non seulement pour le sort du CREA, mais aussi pour le leur propre. La disparition du centre pour certains représentait en effet un problème d'affectation institutionnelle : « on faisait des petites assemblées, des panels pour comprendre où on voulait en venir »[1166]. Les membres n'arrivaient pas à discerner si la véritable cause du risque de fermeture était liée aux luttes intellectuelles et personnelles ou aux « raisons externes », représentées par le changement en acte à l'EP[1167]. Sur ce point, les études STS inscrites dans le paradigme coproductionniste ont bien montré comment cette distinction entre interne et externe, entre épistémique et sociétal, est une barrière érigée par les individus et les groupes sociaux, et qu'en fait toutes ces instances sont si entremêlées qu'elles sont indissociables.

[1162] Dosse, F., *L'empire du sens, op. cit.*

[1163] Entretien avec Jean-Pierre Dupuy, 21.11.12.

[1164] « Un élément d'explication est que, après ma démission de la direction du CREA, en 1999, et excepté l'intérim que j'ai effectué en 2000 à la demande de l'X pour gérer la crise qui a suivi mon départ, je me suis complètement éloigné de la vie du Centre, d'une part pour ne rien imposer à mon successeur, Jean Petitot, mais aussi parce que je me suis trouvé de plus en plus happé par l'Amérique, et surtout parce que je reste Illichien dans l'âme : les institutions sont faites pour nous servir et non pas l'inverse » : mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18.

[1165] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

[1166] *Ibid.*

[1167] *Ibid.*

La figure de Paul Bourgine

À partir de la présidence de Bourgine, une nouvelle lutte à caractère à la fois épistémique et politique fraie son chemin, après celle du début des années 2000 : comme le résume René Doursat, proche de Bourgine et partisan des SSC, « la façon dont Paul Bourgine a lancé l'initiative des systèmes complexes a provoqué indirectement la chute du CREA »[1168]. C'est précisément notre thèse.

Qui est-ce donc Bourgine ? Le polytechnicien explique avoir été

> « toujours intéressé par deux thèmes, l'autonomie et la complexité. L'autonomie parce que la stabilité des systèmes naturels, surtout biologiques, cette capacité de se reproduire et de durer, est un trait tout à fait remarquable. Et la complexité comme tissu de relations, toujours du point de vue biologique. Le fait par exemple que les systèmes vivants renouvellent leurs cellules tous les mois et qu'ils restent les mêmes sans être les mêmes : ce qui reste est le tissu de relations »[1169].

Cette autobiographie intellectuelle succincte résume la première période de recherche de Bourgine, qui s'était faite sous le signe du Groupe des Dix et de Varela. Ce que Bourgine lance au début des années 2000 au sein du CREA est informé bien plus par le SFI que par les courants de la deuxième cybernétique. Malgré les différences de point de vue de nos interviewés, les versions de cette histoire que nous avons collectées convergent sur un nombre important de points. En schématisant (beaucoup, selon certains de nos interviewés[1170]), dès les années 2000 se forment trois grands groupes au sein du CREA : le pôle des systèmes complexes (Paul Bourgine, Jean Petitot, René Doursat, David Chavalarias, les doctorants et les postdoctorants, etc.), le pôle des sciences sociales (Yves-Marie Visetti, Jean Lassègue, David Piotrowski, André Orléan, Jean-Michel Besnier, Lucien Scubla, etc.) et plus tard un pôle qui se perçoit comme intermédiaire, bien que pour des raisons différentes selon chacun d'entre eux (Giuseppe Longo, Alessandro Sarti, Serge Galam, etc.[1171]). Pour ce qui est de l'opposition épistémique entre le groupe modélisateur et le groupe philosophique, Sarti résume les positions en présence ainsi : il y a deux groupes

[1168] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.

[1169] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.

[1170] « Quand tu écris qu'il n'y avait pas de philosophe du CREA qui s'était joints au pôle modélisation tu oublies Michel Bitbol que tu cites par ailleurs souvent. Il a été très actif et a contribué au deuxième colloque de Cerisy. Dupuy est aussi philosophe et était dans le groupe 'modélisateur'. Je pense vraiment que la ligne de fracture 'groupe modélisateur' et 'groupe philosophique' n'est pas la bonne grille de lecture car il y avait à peu près autant de philosophes côté 'groupe modélisation' que de l'autre. Ce n'est pas du tout le même phénomène qu'en 2002. Il me semble qu'il vaut mieux donner plus de poids aux autres lignes de fractures » : mail de David Chavalarias, 10.04.18.

[1171] Certains du groupe des intermédiaires se définissent comme épistémologiquement plus proches du pôle philosophique, d'autres du groupe des modélisateurs des systèmes complexes.

> « [un] plus proche des sciences cognitives, qui peuvent être selon [lui] réduites à des modèles, et un autre porteur d'une idée de cognition plus proche du sens social, défenseur de l'irréductibilité de la cognition et du sens à des simples structures mathématiques ou algorithmiques »[1172].

C'est une histoire de l'affrontement entre deux projets onto-épistémologiques différents, voire opposés[1173]. La conviction de Bourgine dans les SSC est quelque chose que tous les interviewés ont reconnu comme un élément important pour l'essor du conflit. Et Petitot de dire :

> « Je crois qu'il [Bourgine] est convaincu que le paradigme de la complexité est un paradigme scientifique absolument fondamental et qu'il faut enfin des Santa Fe français, même si ce modèle d'institut est déjà un peu obsolète, qu'il ne s'agit pas d'interdiscipline au sens banal, qu'il y a des modèles transversaux qu'on retrouve dans des domaines très différents, et qu'il est essentiel qu'il y ait des gens qui les appliquent dans ces domaines très différents »[1174].

Le penchant entrepreneurial, ou la « forte capacité à s'adapter au contexte »[1175], que tous nos interlocuteurs reconnaissent à Bourgine a mené à d'importants résultats en termes d'obtention des financements, ce qui a fait du CREA un centre hypertrophié par rapport à ce qu'il avait toujours été. René Doursat, ancien élève de l'ENS, physicien, cognitiviste et bioinformaticien qui a été très proche de Bourgine, le décrit ainsi : « personnalité extrêmement passionnante, un agitateur de la science, créateur de structures, […] de programmes, d'instituts, infatigable »[1176]. Selon Visetti, « activiste et militant quand il était jeune, […] [Bourgine] est resté activiste »[1177]. Les membres du pôle philosophique ont beaucoup souligné les aspects épistémiques comme étant l'une des causes fondamentales de la rupture. Mais, comme nous le verrons dans la suite, ces aspects se lient inévitablement et immédiatement à la controverse concernant les différentes visions de politique scientifique en présence au CREA.

[1172] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

[1173] Petitot tient à préciser la présence de nuances dans cette représentation schématique : « On a toujours tendance à binariser de façon manichéenne des différences qui s'inscrivent dans un système compliqué. Si l'on faisait une analyse multidimensionnelle des positions des chercheurs du CREA et si l'on essayait de la linéariser, on pourrait peut-être les situer sur un axe allant d'options techno-computationnelles à des options philosophico-humanistes. Mais cela ne signifie pas que ce sont les extrêmes qui commandent la situation, d'autant plus qu'ils ne sont représentés par personne, chaque chercheur occupant plusieurs positions sur le spectre. Bourgine est un humaniste et Visetti connaît très bien l'informatique » : mail de Jean Petitot, 14.09.18.

[1174] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1175] Mail de David Chavalarias, 08.04.18.

[1176] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.

[1177] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

Les critiques épistémiques

Une première vague de critiques épistémiques adressées au pôle SSC vient des philosophes du langage Visetti, Lassègue et Piotrowski, qui qualifient le pôle modélisateur comme foncièrement désintéressé vis-à-vis de l'aspect philosophique des problématiques traitées par le laboratoire dans son ensemble. Ils ne le font pas d'un point de vue totalement autre par rapport aux représentants des SSC car, comme le volet prosopographique de nos interviewés le montre, tous les membres du CREA avaient un intérêt pour les « sciences exactes ».

Mathématicien de formation, Visetti avait « glissé vers l'informatique dix ans après », pour enfin arriver aux sciences du langage[1178]. Il se considère depuis le début des années 1990 comme un « compagnon de route »[1179] du laboratoire : au début, il avait noué des rapports intellectuels avec Petitot et avec d'autres membres « sur la base de l'essor des modèles connexionnistes »[1180] sans être un membre associé du centre – il le deviendra en 2004[1181].

De formation philosophique, avec une thèse sur l'intelligence artificielle, sur Alan Turing et sur le concept de continu, Lassègue fut recruté au CNRS dans un laboratoire de linguistique de Caen, l'ELSAP, parce qu'il voulait « être plus près de personnes qui faisaient des disciplines un peu plus positives »[1182]. Lassègue avait démarré sa thèse en 1990 sous la direction de Daniel Andler et dit avoir toujours gardé des contacts intellectuels et amicaux avec les anthropologues du CREA, notamment Lucien Scubla et Mark Anspach[1183]. Il profitera de l'invitation de Petitot en 2005 pour quitter son laboratoire, en réaménagement à l'époque, pour rejoindre le CREA en 2006[1184]. Il en deviendra directeur adjoint en 2008, Petitot lui ayant demandé de le remplacer à ce poste.

Ingénieur de formation, Piotrowski avait viré vers la linguistique en passant par l'informatique[1185]. Après une thèse sur Hjelmslev, il rentre au CNRS en 1990, après avoir suivi en 1984-1985 les séminaires de Petitot sur la théorie des catastrophes appliquée au langage[1186]. Après une période d'éloignement de ces thèmes, le contact avec Petitot mènera Piotrowski au CREA en 2001[1187]. Dans les trois cas, l'invitation de Petitot, qui voulait étoffer la famille philosophique du laboratoire, avait coïncidé avec des situations institutionnelles critiques pour ces philosophes.

Quant à Petitot, son projet scientifique est résumé par Besnier ainsi :

[1178] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1179] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1180] *Ibid.*
[1181] *Ibid.*
[1182] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1183] *Ibid.*
[1184] *Ibid.*
[1185] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1186] *Ibid.*
[1187] *Ibid.*

> « Petitot a pris de l'importance après le départ d'Andler et des amis analytiques, avec une problématique claire qui était la naturalisation de la phénoménologie, donc essayer d'articuler le discours en première personne de la phénoménologie avec le discours en troisième personne des neurosciences, essayer de comprendre s'il y avait la possibilité d'interfacer les deux choses »[1188].

Le début des années 1990 était, selon Visetti, l'époque de l'apparition du « vocabulaire de l'émergence »[1189] et de l'idée que l'on peut trouver des « régularités qualitatives »[1190] entre des systèmes physiques différents. En 1992 Visetti, Bourgine, l'économiste André Orléan, Petitot, Varela et le mathématicien et linguiste Bernard Victorri rédigent un manifeste visiblement influencé par le SFI, qui fait appel à une nouvelle forme de modélisation liée aux sciences cognitives et à l'ordinateur, mais qui souligne comme fondamental l'apport théorique de l'épistémologie[1191]. La raison de cela nous la donne une note des archives personnelles de Visetti, où l'on lit :

> « L'approche théorique est la seule qui, en se plaçant en surplomb plutôt que transversalement aux disciplines, limite les effets centrifuges de la transdisciplinarité, c'est-à-dire la perte de sens dans le passage d'une discipline à une autre (par exemple, par le transfert laxiste d'hypothèses non pertinentes dans la disciplines cible) »[1192].

Après le départ du groupe cognitivo-analytique du CREA, « le thème des systèmes complexes, nous explique Visetti, est devenu une sorte d'évidence »[1193], y compris parmi les philosophes, qui furent appelés à plusieurs reprises à prendre part aux discussions autour de l'identité du CREA et au rôle des systèmes complexes en son sein : « on avait des petites fiches dans lesquelles on énumérait les items caractéristiques des systèmes complexes »[1194]. Malgré tous ces aspects, ces trois philosophes soulignent le fait que déjà à l'époque du manifeste de 1992 « le mot [de système complexe] était déjà entaché d'une certaine 'vulgarité' » et qu'« on n'avait pas trop envie de s'en décorer »[1195]. Pendant la décennie 2000-2010, l'éventualité de faire un nouveau document collectif avait été soulevée à plusieurs reprises, sans que cela donne une suite, mais avec l'idée, pour les philosophes, de ne traiter les systèmes complexes que comme un des aspects du CREA[1196] : « parce qu'on considérait qu'il y

[1188] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1189] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1190] *Ibid.*
[1191] Bourgine, P., Orléan, A., Petitot, J., Varela, F., Victorri, B. et Visetti, Y.-M., « Propositions pour un Groupe de Recherche en modélisation des systèmes cognitifs », 22 janvier 1992.
[1192] Visetti, Y.-M., « Sys comp notes », autour de 1999.
[1193] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1194] *Ibid.*
[1195] *Ibid.*
[1196] *Ibid.*

avait quelque chose à la fois d'évident, de trivial, et qu'on était un peu énervés, certains d'entre nous, par la façon dont le mot était pris comme une espèce de solution complète »[1197]. Lassègue, de son côté, avait toujours été frappé par « le slogan *Du physique au politique* », qu'il a toujours jugé « complètement invraisemblable »[1198]. En rêvant de participer à l'essor d'une troisième vague cybernétique, dans son militantisme pour les systèmes complexes Bourgine apporte, selon Piotrowski, « surtout l'approche computationnelle »[1199]. Si pour les autres membres, le rapport cerveau-machine semblait être « complètement métaphorique »[1200], avec le groupe de Bourgine « la modélisation, relève Visetti, était le nouveau terrain sur lequel les questions épistémologiques allaient pouvoir s'élaborer, se décider. C'était la croyance de l'époque »[1201]. Le fait que les systèmes complexes étaient graduellement devenus « le lest principal »[1202] du CREA « aurait pu, toujours selon Visetti, […] ne pas poser problème »[1203], si ce n'est que les conditions « externes » (sur lesquelles on reviendra) ont exacerbé les différends épistémiques :

> « Il y avait eu obligation de changer de directeur et de se retrouver à Palaiseau. Et c'est là qu'on a commencé à entrer en discussion avec l'École Polytechnique pour comprendre quels étaient les thèmes que nous pourrions retenir dans l'identité du CREA. Jusque-là on pouvait ignorer que les systèmes complexes étaient effectivement un déplacement considérable du centre de gravité, mais le problème a surgi au moment où il a fallu absolument se glisser dans un organigramme, lui-même imprécis, du futur système de Palaiseau. C'est là que la guerre civile a commencé »[1204].

En 2010 « le rôle de la modélisation »[1205] se fait sentir sous la forme d'une « réduction physicaliste, d'une naturalisation, d'un positivisme brutal », dit Visetti[1206]. Et Piotrowski de préciser : « ce n'est pas tant la réduction, c'est surtout le fait que toute dimension philosophique et épistémologique était abandonnée » qui posait problème pour eux[1207]. Dans le récit de ce groupe, soutenu par d'autres aussi[1208], les porteurs des SSC semblaient convaincus d'avoir trouvé des outils techniques et épistémologiques

[1197] *Ibid.*
[1198] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1199] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1200] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1201] *Ibid.*
[1202] *Ibid.*
[1203] *Ibid.*
[1204] *Ibid.*
[1205] *Ibid.*
[1206] *Ibid.*
[1207] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1208] Comme le dit André Orléan, ancien membre du premier CREA : « Il y a beaucoup de positivisme [dans les SSC], comme si on pouvait avoir directement accès à la réalité, comme si les individus étaient des atomes. Et moi ça me semble scientiste » : entretien avec André Orléan, 04.04.17.

incontournables, raison pour laquelle il ne restait plus que les appliquer dans la recherche :

> « Les systèmes complexes, explique Visetti, dans ce cadre-là ont semblé être la panacée, l'incarnation d'une certaine épistémologie soi-disant acquise dans un ensemble d'outils de modélisation et il n'y avait plus besoin dans leur esprit de faire de la philosophie et de l'épistémologie. Comme s'ils avaient trouvé le lieu où presque mécaniquement les problèmes trouveront leur horizon de signification et de solution »[1209].

Lassègue renchérit en décrivant cette posture comme « une attitude qui consistait à dire, 'Finalement le travail a déjà été fait, c'est bon. Maintenant il suffit de faire de la modélisation' »[1210]. Ce qui, selon Piotrowski, a « vraiment créé un rejet de toutes les sensibilités autres »[1211]. Quoique Lassègue reconnaisse à Bourgine un intérêt vis-à-vis de l'épistémologie[1212], Visetti regrette que ce dernier n'ait, selon lui, jamais senti « la nécessité ni même la spécificité » d'une réflexion philosophique pour son projet scientifique[1213]. Interrogé sur ce point, et plus particulièrement sur l'utilité des travaux d'Edgar Morin pour une épistémologie des systèmes complexes, Bourgine a répondu

> « qu'il faut faire de l'épistémologie formelle des systèmes complexes. Comment on s'y prend pour les étudier ? À la fois en partant des modèles théoriques et des données existantes, et en acceptant toutes les contraintes des données venant de toutes les disciplines et de toutes les théories partielles sur les systèmes complexes. Je pense qu'une telle épistémologie va mieux avec quelqu'un comme Peirce. Maintenant, si à quelque moment on est perdu, il fait du bien d'avoir aussi des épistémologies proches d'Edgar Morin dans le paysage. Mais l'urgence c'est de développer une épistémologie formelle »[1214].

Quant à la fermeture du CREA, Bourgine explique qu'il « militai[t] pour garder le CREA uni […] [et que] les philosophes ont préféré s'en aller »[1215]. Si ces mots montrent l'intérêt de Bourgine pour la réflexion épistémologique, il faut relever que ni au CREA ni dans le contexte du RNSC il n'y a eu de philosophes embarqués pour accomplir une telle tâche[1216]. Au nom de ses collègues, Visetti reporte que dans la

[1209] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1210] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1211] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1212] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1213] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1214] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
[1215] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1216] Du moins pas dans les termes décrits par le polytechnicien, puisque l'épistémologue Franck Varenne a été impliqué dans la rédaction de la feuille de route du RNSC et il réfléchit souvent aux côtés des scientifiques des systèmes complexes.

période marquée par Bourgine « nous on ne s'y retrouvait pas »[1217]. La conviction du groupe des modélisateurs-informaticiens était, selon les philosophes, « qu'une idée philosophique était presque immédiatement une idée de modèle »[1218]. En même temps, Bourgine, Petitot, Doursat déplorent le caractère tumultueux et conflictuel de Visetti, et Doursat déclare ne pas avoir compris les critiques de ce dernier vis-à-vis des SSC, critiques qu'il qualifie d'« irrationnelles »[1219].

Le deuxième point de divergence épistémique concerne l'arrivée des *Big Data* : « dans les *Big Data* il y a aussi l'idée qu'il n'y a plus besoin de théorie »[1220], « on dispose de données déterminées, on n'a pas besoin de construire ses données »[1221], parce que « les données sont là, sans qualification »[1222]. Selon Visetti, les porteurs des *Big Data* « estiment avoir une nouvelle phénoménologie, les *Data* tels qu'ils apparaissent sur leur écran »[1223]. Pour Piotrowski ces *data* viennent « avec des qualifications déjà livrées », raison pour laquelle il définit ce nouveau domaine comme « un positivisme »[1224]. Si Lassègue dénonce « un vrai divorce théorique »[1225] dans ce domaine, Visetti suggère que les chercheurs et chercheuses rassemblés autour du RNSC « estiment défendre l'idée de science à l'ère des *Big Data* parce qu'un modèle est un principe unifiant, d'intelligibilité, donc sans doute pour eux ils sont dans le bon équilibre »[1226]. N'empêche que pour Piotrowski « ils ont perdu toute interrogation par rapport au concept de phénomène, il n'y a plus de phénomène »[1227] : « pour nous qui travaillons sur le sémiotique, rajoute-t-il, ils ont une conception du signe qui est plus que mutilante », « d'une très grande pauvreté »[1228] corrobore Lassègue. Un relecteur de la communauté des SSC, qui a visionné la première version de ce manuscrit, tient à préciser « l'idée est d'aller dans le Big Data en gardant la phénoménologie et l'épistémologie, cf. le premier chapitre de la feuille de route sur l'épistémologie formelle »[1229].

Bourgine reconnait que dans la dernière période du CREA, « les systèmes complexes se sont mis à occuper la partie la plus importante des activités du centre »[1230], « car, selon lui, on ne peut pas développer les sciences du complexe sans envisager des stratégies plus collectives de travail tant dans la recherche que dans l'éducation »[1231]. Pour cela, Bourgine avance l'hypothèse selon laquelle le déséquilibre létal pour le

[1217] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1218] *Ibid.*
[1219] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
[1220] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1221] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1222] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1223] *Ibid.*
[1224] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1225] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1226] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1227] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1228] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1229] Mail d'anonyme.
[1230] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
[1231] *Ibid.*

laboratoire se soit vérifié entre « le CREA des seniors », qui étaient là depuis dix à vingt ans, et le CREA « des jeunes contractuels, embauchés avec la Région et avec l'Europe »[1232]. Piotrowski, de son côté, confirme que « la coupure [générationnelle] existe »[1233], mais regrette qu'« elle [soit] mal qualifiée »[1234]. Visetti précise en effet qu'il s'agissait de différents « styles intellectuels »[1235]. Selon Piotrowski, les membres les plus anciens du CREA « étaient tous vraiment armés sur plusieurs disciplines »[1236] et s'étaient essayés dans « la modélisation dans le champ des sciences humaines et avaient mesuré les limites de l'exercice »[1237], tandis que, selon lui, les jeunes amenés par Bourgine semblaient « reprendre des outils formels de façon un peu aveugle »[1238]. Il cite à cet égard la phrase efficace du psychologue américain Abraham Maslow : « quand on tient un marteau, tout ressemble à un clou »[1239]. Le clivage seniors-juniors est tout de même parlant pour les trois chercheurs des SHS, car Visetti critique ces « jeunes » du point de vue de la mise en récit de leurs problématiques :

> « Dans les rares exposés que j'ai entendus de ces jeunes, j'étais frappé par le fait qu'ils ne parlaient pas d'épistémologie, mais plutôt de phénoménologie, c'est-à-dire que quand ils abordaient un domaine quelconque, la façon dont ils relataient était extraordinairement pauvre narrativement, sur le plan du roman, des enjeux »[1240].

Chez eux, pour Piotrowski, « c'est comme si les données sont plates, comme si les concepts ou les systèmes de calcul servaient ensuite de simple relevé topographique »[1241]. Nos interlocuteurs relèvent tous un aplatissement du *style de vie épistémique*, pour le dire avec le sociologue Simon Shackley[1242], du groupe opposé au leur ou à celui des débuts du CREA :

> « Une fois que leur modèle est lancé, dit Visetti, il y a plein de situations complètement incompréhensibles et indéchiffrables dans la phénoménologie d'origine qui apparaissent […] Les modèles proposent toute sorte de situations qui

[1232] *Ibid.*
[1233] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1234] *Ibid.*
[1235] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1236] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1237] *Ibid.*
[1238] *Ibid.*
[1239] *Ibid.*
[1240] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1241] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1242] « By *epistemic lifestyle* I mean the set of intellectual questions and problems, and the accompanying set of practices, that provide a sense of purpose, achievement, and ambition to a scientist's work life, as well as the more mundane sense of carrying out those activities necessary to 'getting the job done'. Additionally, an epistemic lifestyle includes the social networks and connections through which scientists organize their individual and collective work » : Shackley, S., « Epistemic Lifestyles in Climate Change Modeling », dans Miller, C.A. & Edwards, P.N., *Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge, London, The MIT Press, 2001, pp. 114-115.

n'arriveront jamais et qui n'ont même pas de sens par rapport à ce qu'on s'était donné comme univers de référence au début. Ça c'est un gros défaut, je trouve. C'est-à-dire qu'il y a comme une couche, qu'on pourrait appeler littéraire et picturale, du phénomène qui manque »[1243].

Besnier lie le début du déclin du CREA au déménagement temporaire du laboratoire dans les locaux de l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA) à Balard, dans le sud de Paris, mais aussi à la présence de ces doctorants informaticiens qui ne s'intéressent plus aux thématiques de la « vieille garde » du laboratoire :

« la vieille garde s'est trouvée de plus en plus débordée par les doctorants nombreux de Bourgine et on a vu coexister deux populations et les passages d'une population à l'autre étaient devenus quand même difficiles, on était vraiment dans la coexistence. On […] allait [au laboratoire] moins souvent, moi j'y allais moins souvent parce que c'était un peu plus loin, parce que j'apprenais beaucoup moins de choses, j'étais moins stimulé et je voyais plutôt des geeks qui étaient un peu des zombies qui étaient sur leur machin […] [quand il y avait] notre séminaire hebdomadaire du mardi, je voyais qu'ils s'ennuyaient »[1244].

Petitot confirme ce point indiqué par les philosophes, en soutenant que faire de la philosophie de la modélisation est « beaucoup plus difficile que ne le pensent souvent certains informaticiens », « parce que la numérisation n'est pas là pour mathématiser des concepts, elle fait autre chose »[1245]. Qu'est-ce qu'elle ferait donc ? « Elle calcule »[1246]. Ceci dit, si Petitot concède que la simulation informatique a une « épistémologie propre », il défend malgré tout la modélisation numérique parce qu'elle propose « des choses extrêmement utiles »[1247].

Les critiques politiques

Les philosophes reconnaissent avoir reçu une invitation de la part de Bourgine pour qu'ils travaillent à une épistémologie des systèmes complexes, mais comme le rappelle Lassègue : « nous on est partis ensemble du CREA pour échapper à ça et pour des raisons sémiotiques liées à ce milieu-là »[1248]. Si les positions de ces trois philosophes donnent déjà une idée claire de la virulence qui a dû caractériser le différend épistémique entre les deux camps – qu'il ne faut pas trop penser comme totalement

[1243] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1244] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1245] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1246] *Ibid*.
[1247] *Ibid*.
[1248] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

homogènes[1249] –, le mathématicien et philosophe italien Alessandro Sarti, se positionnant lui-même entre le pôle philosophique et le pôle des SSC, a fini par prendre une position radicale à côté des collègues sémioticiens. Après une période au Consorzio interuniversitario per la gestione del Centro di calcolo elettronico dell'Italia nord-orientale de Casalecchio di Reno (ou CINECA), près de Bologne, en tant qu'ingénieur chargé de la simulation et la visualisation scientifique, Sarti fit un postdoctorat à Berkeley sur des techniques mathématiques d'évolution des fronts, qui sont appelées techniques *level set*, pour enfin obtenir un poste à l'Université de Bologne[1250]. En 2005 il devient membre associé du CREA, tout en restant en poste à Bologne, jusqu'à ce que Bourgine lui propose d'essayer le concours au CNRS, que Sarti passe en tant que directeur de recherche[1251]. Ce mathématicien et philosophe confirme le point soulevé par Lassègue, Visetti et Piotrowski à l'égard de l'absence de réflexion épistémologique au sein des SSC : « une chose que je me suis senti dire pendant toute ma recherche [au CREA], c'est que la théorie ou la philosophie a déjà été faite, que maintenant c'est le temps des applications »[1252]. Dans un séminaire de l'ENS, Sarti avait connu Giuseppe Longo, dont il dit avoir estimé l'approche à la fois scientifique et philosophique, et avait proposé de l'inviter au CREA[1253]. Ce n'était pas seulement pour des raisons de collaboration scientifique, mais aussi dans la perspective d'essayer d'harmoniser « ces visions différentes »[1254] qui partageaient le CREA en factions, Longo étant l'un des rares chercheurs apprécié à la fois par le pôle des philosophes et par le pôle des modélisateurs. Le fait que cela n'ait pas marché semble évident dans le genre de critiques que Sarti adresse aux SSC : « Mon rapport avec les sciences des systèmes complexes n'est pas qu'un problème épistémique, c'est aussi un problème de nature éthique »[1255]. D'un point de vue épistémique, Sarti critique le volet computationnel des SSC pour leur prétention à tout réduire à ce que Thom nomme les « saillances » :

[1249] Suite à la lecture d'une première version du manuscrit, plusieurs interviewés nous ont fait part de certaines remarques afin de ne pas trop réifier les deux pôles : « Une remarque ensuite sur la façon de désigner les « camps » en présence. Evidemment, aucun nom ne peut convenir tout à fait. Toutefois, il nous paraît que la paire d'opposés *modélisateurs* vs. *philosophes* (ou encore linguistes…) porte à confusion – ou du moins que le lecteur devrait être averti à leur propos. D'une part, parce que certains modélisateurs se retrouvaient dans le camp desdits 'philosophes' (c'est le cas par exemple de Serge). Ensuite parce que même si le camp des 'modélisateurs' comptait une large majorité de personnes qui ne faisaient que cela, il comptait aussi dans ses rangs au moins un chercheur de haute culture philosophique comme Petitot. Symétriquement, ceux que tu nommes 'philosophes' avaient souvent une première culture scientifique éprouvée, éventuellement de très haut niveau. Ce sont finalement davantage les questions du statut de la modélisation, et celle de l'intervention de la philosophie dans la recherche proprement scientifique qui divisaient le laboratoire » : mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.
[1250] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1251] *Ibid.*
[1252] *Ibid.*
[1253] *Ibid.*
[1254] *Ibid.*
[1255] *Ibid.*

> « Thom distingue deux formes intéressantes, les formes saillantes et les formes prégnantes. Les formes saillantes sont les formes du monde, la forme d'une ville, des objets que je vois, etc. Les formes prégnantes sont liées aux grands principes de la régulation biologique, comme la sexualité, l'agressivité, la coopération, la faim, la douleur. C'est-à-dire les formes du corps, de l'affection. Et il dit, attention lorsqu'on traite les systèmes humains […] il faut toujours les décrire en termes de la relation entre leurs saillances et leurs prégnances, à savoir ce que cette forme veut dire pour un sujet particulier. […] Aujourd'hui le grand risque de la modélisation dans les sciences sociales, c'est de traiter des systèmes de sens comme des systèmes de vérité, c'est-à-dire comme des systèmes de saillance, abstraits »[1256].

D'un point de vue éthico-politique, Sarti soutient « que c'est le volet technologique celui pour lequel les systèmes complexes sont financés, non pas par des institutions de type scientifique, mais par des institutions de type politique, administratif ou technologique »[1257]. Pour lui, les SSC deviennent

> « des technologies au service du marketing, de la finance, et de ce qu'on pourrait synthétiser avec le mot de '*governance*', qui est cette forme abstraite de contrôle politique qui apparemment n'appartient à personne, mais qui appartient au régime de l'optimisation […] Un des fondateurs de l'ISC, dont je ne dirai pas le nom, était même convaincu que les outils des sciences des systèmes complexes puissent remplacer l'action politique »[1258].

Le regard critique que le pôle des philosophes adresse aux modélisateurs des SSC n'est pas qu'épistémique : d'un côté les premiers critiquent les seconds en tant que porteurs d'une pensée mutilante, irréfléchie, mécanique, de l'autre on leur reproche de s'asseoir sur l'idéologie d'un capitalisme efficient et optimisateur. Les modélisateurs, de leur côté, ne voyaient pas d'un mauvais œil une deuxième scission du CREA. On aura l'occasion d'en parler plus bas.

La question du cours à Polytechnique

Un autre sujet de dispute entre les membres du CREA c'est la question de l'enseignement à Polytechnique tenu par Petitot. Certains de nos interviewés le repèrent comme l'« origine même du différend »[1259], ou comme « le commencement de la perte de confiance entre les membres, et d'une cristallisation des deux camps »[1260]. D'autres en minimisent l'importance : « C'était anecdotique car la crise

[1256] *Ibid.*
[1257] *Ibid.*
[1258] *Ibid.*
[1259] *Ibid.*
[1260] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

interne était beaucoup plus forte que juste un problème de nomination de professeur »[1261]. Lors du départ de Petitot à la retraite en 2009, plusieurs personnes candidatent pour obtenir le poste, notamment le socio-physicien Serge Galam, le philosophe Michel De Glas, le philosophe Jean-Michel Besnier et le neurobiologiste Yves Frégnac. L'élection de ce dernier fut vécue par les philosophes comme une trahison de la part de Petitot vis-à-vis de l'esprit pluraliste du CREA. Comme l'explique Sarti :

> « L'hétérogénéité du CREA n'était pas représentée par [Frégnac]. Penser à un cours qui soit représentatif du CREA était une tâche difficile, mais extraordinairement intéressante. Jusqu'à ce moment-là Petitot avait réussi dans cette tâche, parce qu'il a toujours eu cette dualité de scientifique et de philosophe »[1262].

Galam témoigne, de son point de vue de candidat, d'un sentiment de trahison (« les jeux étaient faits »[1263]) pour cet évènement que lui aussi considère comme le début de la « rupture ».
Le cours attribué au CREA par l'École Polytechnique, qui avait été de Dupuy au début, possédait une certaine importance aux yeux des membres. Lorsque Dupuy prend sa retraite, il divise son enseignement en deux : une partie modélisatrice et dédiée aux sciences cognitives que Petitot avait héritée et une partie de philosophie politique et morale (discipline importante pour le CREA) qui avait été récupérée par Monique Canto-Sperber[1264]. Quant au rôle de ces deux moitiés de cours, « c'est important pour un centre de l'École Polytechnique que d'avoir un enseignement »[1265], remarque Petitot ; « parce que ça montrait qu'une unité de recherche enseigne un peu »[1266], précise Visetti ; et parce que, comme le remarque Piotrowski, les postes de professeurs à Polytechnique sont très rares et donc « honorifique[s] »[1267]. À l'occasion des discussions sur la succession de son poste, Petitot dit avoir expliqué à la Direction de l'École Polytechnique qu'il fallait garder les deux parties du cours. Si d'une part, comme l'explique Dupuy, Canto-Sperber « a dû interrompre son enseignement à l'X devant la forte opposition que celui-ci suscitait de la part de l'ENS, surtout chez les scientifiques »[1268], les sélections avaient commencé pour le poste de modélisation. Les

[1261] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
[1262] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1263] Entretien avec Serge Galam, 21.01.16.
[1264] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16 ; Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1265] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1266] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1267] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1268] Mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18. Monique Canto-Sperber a été professeur à l'École Polytechnique de 2006 à 2010 directrice de l'ENS de 2005 à 2012. L'X l'avait choisie pour établir des ponts entre les deux écoles, mais l'ENS n'avait pas approuvé cette nomination. Dupuy, dans le même mail, donne son explication de ce point : « Une vieille et absurde jalousie entre les deux Écoles, qui remonte à leur même origine dans la Convention de la Révolution française) ».

philosophes relatent avoir ressenti, comme Galam, que la sélection était un jeu décidé par avance : si Petitot avait invité certains membres du CREA à candidater, selon Visetti « il poussait à sa place son copain des neurosciences, Yves Frégnac, spécialiste des champs récepteurs du système visuel […] quelqu'un qui aurait représenté une version un peu dure de ce que Petitot faisait »[1269]. Bien que Frégnac ait demandé d'être associé au CREA, pour être un candidat plus proche du centre, les philosophes perçurent les collaborations de Petitot avec Frégnac comme le « signe qui […] indiqu[ait] ce qu'il privilégiait »[1270], c'est-à-dire la volonté de « recentrer le CREA sur des neurosciences cognitives »[1271]. Eric Godelier, directeur des SHS à l'École Polytechnique, définit cette affaire comme une sorte de « coup d'État à l'intérieur du CREA » et explique pourquoi ainsi :

> « Cela a été très compliqué avec Yves Frégnac, pas pour la qualité scientifique, parce que c'est un très grand intellectuel des sciences cognitives, mais parce que voilà, c'est quelqu'un qui faisait toute sa recherche au CNRS, sur le plateau de Saclay à Gif[-sur-Yvettes] et Jean Petitot nous avait vendu Yves Frégnac comme étant un membre du CREA. Ce qui était la doctrine de l'École, c'est-à-dire on recrute un professeur puisqu'il y a des masters […] cela fait des thésards, etc. Et je me rappelle d'une réunion où je présente, avec tous les gens du labo, voilà, les recrutements, et il y a un chercheur du CREA qui m'agresse, qui me dit, 'C'est un scandale le recrutement d'Yves Frégnac, parce que c'est encore une fois le CREA qui s'est fait avoir' »[1272].

Godelier dit avoir ignoré, au moment de la nomination de Frégnac au poste de professeur, le fait qu'il ne soit pas un membre du CREA, et avoir fait confiance à Petitot. De son côté, Petitot tient à démentir catégoriquement cela et dit se demander d'où a pu venir le malentendu puisque Frégnac s'est présenté comme le directeur du Laboratoire Unité de Neurosciences Information et Complexité[1273]. Selon lui, peut-être qu'Eric Godelier pensait que, bien que seulement membre associé, Frégnac disposait du soutien de l'ensemble des membres du CREA, et qu'il a été surpris de constater que ce n'était pas le cas. Petitot a envoyé une lettre officielle au comité, en y regrettant « l'inélégante rigueur administrative qui [lui] empêch[ait] d'être présent » et en y commentant positivement les deux candidats présélectionnés par le département sans pour autant exprimer de préférence pour aucun des deux[1274]. Et il soulignait à propos de Frégnac : « Évidemment, le risque serait d'une part que sa candidature soit trop 'biologique' et se décale vers le département de biologie et, d'autre part, que son

[1269] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1270] *Ibid.*
[1271] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1272] Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
[1273] Mail de Jean Petitot, 14.09.18.
[1274] *Ibid.*

activité d'enseignement profite plus à son propre centre qu'au CREA »[1275]. Il explique l'élection de Frégnac ainsi :

> « Ce n'est vraiment pas de ma faute, puisque l'École Polytechnique m'a interdit de participer aux débats, en disant, 'Tu es à la retraite et il s'agit en plus de ta succession : tu n'as donc pas le droit d'intervenir'. Je n'ai rigoureusement rien à voir avec le choix final du Département. Simplement, ils savaient que je trouvais Frégnac très bien et que j'avais travaillé avec lui. Ils savaient aussi que je trouvais également Jean-Michel Besnier très bien »[1276].

Besnier, qui fut candidat au poste, confirme les versions précédant celle que l'on vient de citer :

> « j'avais préparé une candidature très élaborée. [Petitot] m'avait donné à penser qu'il allait me soutenir, il m'avait même fait répéter mon audition, c'était mon coach. […] Il m'a chauffé pour cette candidature, Alain Finkielkraut me soutenait. Le jour de l'élection [Petitot] m'a cassé et il a fait nommer Frégnac. On l'a très mal vécu au sein du CREA parce que ce poste était le poste du CREA […] Petitot a commis une traîtrise »[1277].

Conscient de la gêne que cette affaire a pu exercer sur le pôle philosophique du centre, Petitot brise une lance en faveur de ce dernier :

> « Bref, la partie philosophique du CREA n'a pas été contente du tout de la nomination de Frégnac, et après-coup je le comprends très bien. Imaginez qu'un philosophe soit au CREA et que tous ses collègues soient sur Paris ; et imaginez qu'on lui propose un avenir où le directeur de son laboratoire [Bourgine] travaille du côté du computationnel, de l'informatique, des grilles de calcul, promeut un déménagement à Palaiseau (ce qui est un exil géographique), et que d'autre part un enseignant spécialiste de neurosciences couvre le poste de l'enseignement du centre »[1278].

Petitot décrit une sorte d'encerclement des philosophes par les diverses manifestations du pôle computationnel sur les espaces institutionnels, à quoi s'ajoute la disparition de la deuxième partie du poste, celle dédiée à la philosophie morale[1279]. Selon lui, cette

[1275] Mail de Jean Petitot, 17.10.18.
[1276] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1277] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1278] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1279] *Ibid.*

disparition fut dramatique car le poste aurait dû revenir à Besnier[1280]. Ce que nous avons décrit dans le chapitre 2 à propos du projet épistémique des SSC, on le retrouve ici ancré dans une affaire institutionnelle : une *asymétrie de prises* des représentants des sciences computationnelles sur les autres.

La question de l'enseignement a généré un autre type de problèmes. Petitot considère que l'enseignement des SHS à l'École Polytechnique se divise en trois catégories : les SHS pour l'entreprise (économie, gestion), les SHS comme « supplément d'âme » pour les ingénieurs[1281] et les SHS formalisées (auto-organisation, morphogenèse, complexité) telles que celles menées par le CREA[1282]. « Dans les derniers rapports, reporte Sarti, l'École Polytechnique nous demandait aussi de former les élèves dans le domaine des sciences sociales »[1283]. Selon Sarti, le CREA – d'abord un centre de recherche – aurait été « assommé » par une telle requête[1284]. Les membres du centre avaient jusque-là dirigé des mémoires ou encadré de « petits stages »[1285] pour les élèves de l'École Polytechnique. Maintenant on leur demandait non pas de prendre en main un enseignement supplémentaire, mais, comme le dit sarcastiquement Sarti, d'éduquer les étudiants à avoir des sujets de conversation lors des fêtes :

> « Ils ne nous ont pas proposé un enseignement, mais d'avoir des contacts avec les étudiants, de manière à les rendre érudits sur les rapports entre les sciences et les sciences sociales. Pour éduquer les polytechniciens qui se trouvent à une party, non ? Pour réussir à parler facilement aussi de Platon, à avoir quelques pensées philosophiques de manière anecdotique, ce qui peut passer comme une forme de culture générale dans des situations sociales »[1286].

Après coup, la question de l'enseignement vient à être lue par plusieurs de nos interlocuteurs comme le début de la crise. En effet, si au moins deux grands camps ont toujours été présents au CREA et que leurs débats ont toujours structuré le laboratoire tout au long de son existence, ce qui ne s'était jusque-là pas ouvertement manifesté, c'était un déséquilibre socio-institutionnel en faveur d'une partie.

[1280] Mail de Jean Petitot, 14.09.18.

[1281] « [L'École Polytechnique] a un peu de sciences humaines. […] Il y a des disciplines qui conviennent parfaitement à Polytechnique, comme l'économie, l'économétrie, la gestion. […] Pour le côté 'honnête homme' il faut aussi un peu d'autres sciences sociales, d'humanités, en quelque sorte comme supplément d'âme : un peu de musique, un peu de peinture, un peu d'histoire, un peu d'architecture, un peu de littérature, etc. » : entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1282] *Ibid.*

[1283] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

[1284] *Ibid.*

[1285] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

[1286] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

Le rapatriement du CREA à Palaiseau

L'autre grand terrain de conflit concerne le rapatriement du CREA sur le plateau de Palaiseau, où Godelier avait préparé un bâtiment de 1000 m^2, où chacun des trois laboratoires parisiens pouvait avoir un étage[1287]. En 2008 le CREA est forcé d'abandonner le site de la Montaigne Sainte-Geneviève. Le rapport AERES de février de la même année suggère une « bilocalisation du CREA à Paris (pour la composante davantage épistémologique et philosophique) et à Palaiseau (pour la composante modélisatrice et scientifique) »[1288]. Le laboratoire déménage tout entier temporairement dans les locaux de l'ENSTA, dans l'attente de rejoindre Palaiseau. Le déménagement du CREA à l'ENSTA, dû au besoin du Ministère de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur de récupérer les locaux[1289], est vu, par les philosophes, comme le premier pas vers la perte de l'autonomie qui avait caractérisé le laboratoire jusque-là ; il s'inscrit en outre dans une reconfiguration plus générale de Polytechnique :

> « Tout le plateau de Palaiseau-Saclay devait se transformer et devenir une grande zone scientifique et donc progressivement notre horizon s'est chargé de la responsabilité de comprendre comment le CREA avec ses problématiques propres pourrait s'insérer dans ce futur grand technopole. Et c'était insoluble »[1290]

Lassègue, qui à l'époque était directeur adjoint du CREA et qui avait pris soin du déménagement, relate que, si jusque-là le laboratoire avait été laissé libre, « on a commencé à sentir qu'on faisait partie de l'École Polytechnique »[1291]. Les différends entre les deux grandes factions du laboratoire s'intensifient donc du fait de la controverse concernant le rapatriement à Palaiseau. Toutefois, cela serait une erreur de penser que le pôle philosophique était complètement soudé dans le refus d'aller à Palaiseau et que le pôle SSC était uni autour du déménagement ultérieur. Comme Bourgine, Petitot relate cette histoire en faisant référence à un problème d'ordre générationnel : « depuis trente ans on était restés à Paris, avec le Centre de Gestion et le Centre d'Econométrie [de l'EP] […] il y avait quelques personnes qui

[1287] Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.

[1288] AERES, *Rapport du comité d'experts. Unité de recherche : Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) – UMR 7656 de l'École Polytechnique*, février 2008.

[1289] Chavalarias explique que le CREA avait obtenu une lettre signée par Jacques Chirac, lorsqu'il était Président, pour que l'École Polytechnique maintienne ce laboratoire à Paris : « Ça c'est Petitot qui avait raconté ça un jour, c'est que c'était arrivé jusqu'à Chirac le fait que X devait garder une implémentation sur son site originel, et donc il y avait un papier signé du Président, disant 'Il faut que X garde un labo'. Puisque c'est un endroit très recherché, apparemment à plusieurs reprises les différents ministères voulaient récupérer les locaux et à chaque fois ils sortaient le bleue de Chirac, en disant 'Le Président a dit, non, non, il faut qu'on reste'. Après, comme ça a changé de Président, ce truc-là avait j'imagine beaucoup moins d'effet » : entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

[1290] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

[1291] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

éventuellement acceptaient d'aller à Palaiseau. Mais tous les autres voulaient rester à Paris »[1292]. Qui aurait accepté le rapatriement ?

> « C'était, selon Petitot, essentiellement la partie de modélisation numérique ayant besoin de grilles de calcul et d'importantes ressources computationnelles, et surtout les jeunes. Les jeunes n'étaient pas tellement gênés d'aller là-bas et de se retrouver avec de nombreux informaticiens et physiciens. Sur ce point, il s'est vraiment produit un écart »[1293].

Même s'il n'était pas enthousiaste à l'idée d'un tel déménagement, le secrétaire des deux dernières années de vie de l'institution, Marcel Skrobek, mettait en relief les aspects positifs de ce transfert :

> « moi je pariais sur l'apprentissage des nouveaux lieux. Quand vous êtes dans un nouvel environnement, vous découvrez des gens différents, et que ces gens différents vont peut-être vous apporter quelque chose. […] À Palaiseau il y a des vrais moyens […] des conditions de vie que tout le monde n'a pas tous les jours. […] si vous avez besoin de quelque chose et que vous êtes à Polytechnique, une fois que c'est acté ça se fait »[1294].

Cependant, si l'on interroge les anciens doctorants et postdoctorants du CREA de l'époque, l'on voit que le clivage n'est pas si net. Romain Reuillon, ancien postdoctorant du CREA et aujourd'hui ingénieur d'étude au CNRS rattaché à Géographie-Cité et à l'ISC-PIF, dit plutôt que parmi les modélisateurs « personne ne voulait aller à Palaiseau »[1295]. Il explique que Bourgine, attiré par la possibilité d'avoir dans un même lieu les théoriciens et les expérimentateurs, avait essayé d'infuser de l'enthousiasme chez les membres de l'institut. Toutefois certains, qui avaient commencé à travailler une partie de leur temps dans les laboratoires de Palaiseau, n'étaient pas très satisfaits :

> « Paul voyait ça comme stratégique d'aller à Palaiseau, il a mis beaucoup d'énergie au point de nous dire que tous les jours on allait faire la fête dans le RER [le métro reliant Palaiseau à Paris] en rentrant. […] Il essayait de communiquer un enthousiasme qu'on aille là-bas et tout ça, sauf que les gens qui y sont allés, partiellement, très peu, c'est les gens de BioEmergence [un projet de modélisation numérique de l'embryogenèse] […] qui y sont allés quelques jours par semaine en

[1292] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1293] *Ibid*.
[1294] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1295] Entretien avec Romain Reuillon, 07.02.17.

> râlant et le résultat c'est qu'ils bossaient rue Lhomond. […] Paul était pas soutenu par les gens qui étaient à l'ISC, ça c'est clair »[1296].

Au-delà de l'aspect pratique lié aux déplacements vers Palaiseau, il fallait considérer selon Reuillon le « côté fonctionnel » de l'ISC-PIF qui devait faire office de « fourmilière », être un lieu de passage : la localisation parisienne était, à cette fin, indispensable. Bourgine minimise le propos de Reuillon, en expliquant que pendant la phase intermédiaire à l'ENSTA ce dernier était particulièrement embêté par le service Internet. La connexion au réseau était instable pour des causes administratives :

> « cela n'allait pas à Romain parce que l'ENSTA était en conflit avec le LISC [Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes, où Reuillon avait fait un postdoc] […] Comme on occupait des locaux, on consommait des ressources de l'ENSTA et le LISC avait dit qu'il paierait la contrepartie de cela et ne le faisait pas. Et donc, en fait on n'a pas eu un accès facile au Web pendant un ou deux ans, et cela n'allait pas du tout à Romain »[1297].

L'ISC-PIF se trouve aujourd'hui tout aussi écarté que l'ENSTA par rapport à la Montagne Sainte-Geneviève, puisqu'il se trouve dans le treizième arrondissement de Paris. Pourtant nous le trouvons toujours peuplé. Mais aller à Palaiseau n'aurait probablement pas eu le même effet sur les flux de personnes se rendant au CREA pour y travailler régulièrement. Galam donne un témoignage en accord avec celui de Reuillon, tout en minimisant cet élément du rapatriement dans l'économie de la controverse : « personne, moi compris, ne voulait aller à Palaiseau. Mais ce n'est pas un élément qui a été déterminant »[1298]. Pour Bourgine tout ce problème reste presque anecdotique : « En fait, il y avait moyen de tricher complètement. Cela n'avait aucune espèce de pertinence ce point-là »[1299]. Pour lui, « seraient allés à Palaiseau ceux qui avaient envie »[1300], car « les scientifiques n'y vont pas souvent mais ils assurent le minimum syndical »[1301]. En même temps, il se souvient avec regret de la possibilité manquée d'avoir des « antennes » de l'ISC-PIF chez les partenaires, car « cela aurait pu très, très bien marcher : on avait déjà des locaux […] et toute cette histoire fait que l'on n'a pas pu vraiment en profiter »[1302]. Pour Sarti, la perspective est totalement autre : « Le CREA […] est un lieu qui doit rester en ville, en contact avec la

[1296] *Ibid.*
[1297] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1298] Entretien avec Serge Galam, 21.01.16.
[1299] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1300] *Ibid.*
[1301] *Ibid.*
[1302] *Ibid.*

citoyenneté, et […] dans un campus scientifique n'a rien à dire […] »[1303]. Besnier explique l'importance du positionnement en ville avec un exemple pratique :

> « Comment voulez-vous à Palaiseau attirer des chercheurs étrangers qui viennent à Paris pour trois jours ? Si on perdait notre antenne parisienne on allait perdre énormément en termes de réseaux avec les philosophes, avec les linguistes, bref on ne devenait plus cette espèce de carrefour qui incarnait vraiment notre interdisciplinarité, c'était ça notre force »[1304].

La question du choix du directeur

La plupart de nos interviewés considère que la question déterminante pour la rupture définitive est celle du choix du directeur. Le seul départ de Bourgine est déjà riche d'enjeux. Si Visetti explique, au nom des philosophes, que la direction de Bourgine avait déjà été perçue comme une perturbation de l'équilibre garanti jusqu'alors par Petitot[1305], après le départ de ce dernier « au CREA il y a eu une guerre civile, avec trois propositions de directeur avortées et même des batailles électorales pour modifier le cœur électoral »[1306]. Ce point de vue de Visetti a été évoqué par d'autres interlocuteurs. Sachant que la vie interne du CREA fonctionnait par assemblées, auxquelles participaient tous les membres du laboratoire au même titre, lors des dernières élections pour le directeur le corps électoral s'enrichit d'une quinzaine de doctorants inscrits dans les SSC : « ça a créé des problèmes parce qu'à un moment donné, explique Nadine Peyriéras, [Bourgine] avait presque autant de contractuels qu'il avait de statutaires »[1307]. De sa part, Bourgine relate :

> « L'ennui c'est qu'ils ne votaient pas. […] normalement quand on fait plus que vingt, on doit faire des assemblées générales et on doit faire des conseils de labo. Et cela, les anciens du CREA, donc les statutaires, ont refusé que ce soit fait conformément aux règlements. Ils voulaient garder les pouvoirs... »[1308].

Le dernier secrétaire général du CREA Marcel Skrobek, intervenu pour gérer les situations comptables difficiles, soutient que les normes étaient du côté de Bourgine : « les gens qui avaient un an d'ancienneté étaient autorisés à participer à la vie du laboratoire, et ils pouvaient voter. Mais ça, c'est réglementaire »[1309]. Ces doctorants et postdoctorants passaient la plupart de leur temps à l'ISC-PIF et étaient perçus par les

[1303] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1304] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1305] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1306] *Ibid.*
[1307] Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.
[1308] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1309] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.

membres habituels du CREA comme des étrangers avec un pouvoir de vote. Besnier illustre ce point de la manière suivante :

> « [Bourgine] s'était installé à ce moment-là près de la rue d'Ulm […] c'est là qu'il avait son fief. On nous disait qu[e les jeunes doctorants de l'ISC] étaient membres du CREA et qu'ils avaient le droit au vote, mais nous on ne les voyait jamais, ils venaient jamais à nos réunions. On a fait quelque assemblée générale et c'est là qu'on a découvert qu'il y avait plein de monde autour de Bourgine. Donc ça a créé un petit peu une situation délétère »[1310].

Pour Bourgine c'est une querelle entre Anciens et Modernes : « les votes étaient vraiment à l'envers d'un renouvellement des thèmes et d'un renouvellement des jeunes, et c'est cela le point quoi »[1311].
En 2010, Bourgine est contraint par le ministère de l'Agriculture[1312] d'abandonner la direction du centre, même s'il souhaitait obtenir des dérogations :

> « j'ai eu l'appui de Michel Rocard et du Président des Missions Scientifiques des deux assemblés, mais cela n'a pas été suffisant. […] Le Ministère de l'Agriculture à un moment a répondu en disant, 'Vous savez Monsieur Bourgine, cela fait quinze ans que l'on vous met à disposition de l'École Polytechnique gratuitement, on pense avoir suffisamment cotisé'. De fait c'était exceptionnel, je ne crois pas qu'il existe un autre cas »[1313].

Scubla, Galam et d'autres lui reprochent de ne pas avoir préparé sa succession, car il aurait été convaincu de pouvoir garder la direction. Bourgine d'une part montre de la compréhension et de la reconnaissance envers son ancien ministère, d'autre part il regrette le fait qu'on ait manqué une occasion, et cite le support de son ami politique Michel Rocard à toute l'entreprise des SSC :

> « je remercie le Ministère de l'Agriculture de m'avoir mis à disposition du LISC et il n'y a rien à dire finalement. Mais c'est dommage parce que c'était le moment, et c'est bien cela que voyait aussi Michel Rocard, parce que j'avais aussi discuté avec lui […] du Campus du Système Complexe, il avait beaucoup aimé aussi. Michel Rocard, c'est celui qui a fait l'introduction de la première conférence des systèmes complexes à Paris »[1314].

[1310] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1311] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1312] Dont dépendait son institution de rattachement (ex-CEMAGREF, puis IRSTEA).
[1313] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1314] *Ibid.*

Après son départ, Bourgine laisse un centre avec des problèmes financiers, la gestion des fonds ayant été, selon certains de nos interlocuteurs, problématique. Après des relations difficiles avec Bourgine, Lassègue assume la direction par intérim[1315] et accompagne le CREA tout au long de cette phase confuse et conflictuelle, en nommant un nouveau comptable et secrétaire général du CREA et du GIS RNSC, le déjà-cité Marcel Skrobek, qui explique ainsi la raison de sa venue :

> « un jour, une personne que je connaissais, un responsable des ressources humaines, est venue me voir en me disant : on a besoin de quelqu'un pour redresser un laboratoire, un gros laboratoire. […] Il y avait des dépenses un peu tous azimuts, qui n'étaient pas très contrôlées. […] Pour un labo dit d'épistémologie apparenté aux philosophes, on gérait 3,5 millions d'euros par an »[1316].

Skrobek fut doté d'un pouvoir considérable, car aucun acte administratif signé par le directeur n'entrait en vigueur sans sa signature.
L'élection d'un nouveau directeur représente l'un des moments de plus haute tension, car comme nous l'a raconté Chavalarias c'est un enjeu important pour l'orientation que le CREA allait prendre : « c'est [lors du renouveau de la direction du CREA que] ça se passe mal, parce que le directeur était celui qui allait donner l'impulsion d'aller à Palaiseau ou de chercher une nouvelle tutelle, des choix qui ne sont pas des choix scientifiques »[1317]. La première difficulté, selon Chavalarias, était représentée par l'absence de candidats intermédiaires entre ceux qui étaient proches de la retraite et ceux qui étaient trop jeunes pour paraître crédibles aux yeux des tutelles.
La candidature de Michel De Glas fut la première à être prise en considération. Logicien, il proposa un projet qui incluait les systèmes complexes, mais qui laissait de l'espace aux recherches du pôle philosophique :

> « après Bourgine, reporte un anonyme, ce fut lui le premier qui semblait pouvoir obtenir le consensus général. Il ne fut pas élu, peut-être parce qu'il était scientifiquement bon, mais que dans les relations humaines il avait quelque difficulté, il n'était pas diplomatique. Il fut tellement amer par ce déni qu'il quitta le centre immédiatement »[1318].

Petitot explique que De Glas reçut les votes des philosophes, mais non pas ceux des « jeunes », qui lui préférèrent le candidat neurobiologiste Yves Burnod. Besnier nous a raconté que De Glas « avait une position plus rigoriste sur l'avenir du CREA, il

[1315] Godelier nous a raconté qu'il avait proposé à Lassègue de prendre son HDR pour candidater au poste de directeur après le départ de Petitot. Mais Lassègue ne prendra pas son HDR à temps et se refusera à l'idée de candidater : entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
[1316] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1317] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1318] Entretien avec anonyme.

s'opposait au déménagement à Palaiseau, il refusait tout ce qui ressemblait à du Bourgine »[1319]. Par ailleurs, l'opinion de Petitot à propos de De Glas, qu'il avait fortement soutenu pour lui succéder à la direction du DEA de sciences cognitives en 2006, clarifie la raison du possible refus de la part du pôle SSC :

> « J'estime que les neurosciences sont la discipline maîtresse dans les sciences cognitives et De Glas n'a jamais été d'accord. Il est assez opposé aux neurosciences, non pas bien sûr en tant que neurosciences, mais en tant que discipline fondamentale des sciences cognitives. Il est beaucoup plus tourné du côté logique, et il n'est pas du tout réductionniste »[1320].

Yves Burnod, « un polytechnicien qui a fait des neurosciences depuis la fin des années 1960 »[1321], proche de Bourgine, fit campagne et obtint le support de l'École Polytechnique et du CNRS, mais il n'obtint pas la majorité des votes non plus : « Pour plusieurs raisons, nous a dit Chavalarias, mais une des raisons c'est qu'il représentait plutôt le modèle science sur projet qui allait à Palaiseau, et donc il ne faisait pas totalement consensus »[1322]. D'après Bourgine, l'opposition vint du « CREA des philosophes », qui ne pouvaient pas s'opposer à la présence des doctorants, mais qui refusaient toute nouvelle entrée d'éventuels associés confirmés[1323].
Ce fut ensuite le tour de Besnier, qui selon Petitot faisait consensus :

> « Là tout le monde était content, les deux parties du CREA étaient d'accord. Jean Michel est philosophe mais a aussi l'expérience des Grandes Écoles, en particulier de l'Université Technologique de Compiègne […]. Mais la veille au soir de son entrée en fonction, il dit 'Je refuse' »[1324].

Les tutelles avaient approuvé le « tandem » que Besnier aurait pu faire avec Giuseppe Longo[1325], informaticien, mathématicien et philosophe à l'ENS[1326]. Godelier confirme

[1319] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1320] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1321] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1322] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1323] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1324] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1325] Besnier nous a raconté que Longo « approchait 65 ans et il était extrêmement embêté parce qu'il savait qu'il allait être viré. Aux abords de 65 ans il s'est rapproché plus du CREA en espérant qu'il obtiendrait une responsabilité à la direction qui conduirait le CNRS à rallonger son activité. Donc il pensait que s'il avait une responsabilité il pourrait aller au moins jusqu'à 67 ans et donc Jean Lassègue était intervenu sur moi en me disant, 'Écoute, quand tu seras directeur du CREA, tu le prends comme directeur adjoint' » : entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16. Longo tient à préciser que, s'il est vrai que la position de directeur adjoint lui aurait permis un rallongement de carrière, son investissement dans le CREA était de longue date, que la collaboration avec certains de ses anciens membres dure encore aujourd'hui et surtout qu'il s'était « vraiment engagé dans la tentative de le faire survivre aux fractures », qu'il voulait « seulement le relancer pour une paire d'années, le temps de passer le relais à quelqu'un plus jeune » : mail de Giuseppe Longo, 07.04.18.
[1326] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

ce point[1327] et relate sa tentative de garder l'unité des deux équipes, malgré les propositions de Petitot en faveur des candidats issus des sciences dures :

> « [Lorsqu']il s'agit de trouver un nouveau directeur […] Petitot essaie de nous faire passer des gens qui étaient vraiment […] en sciences dures, sciences naturelles, c'est-à-dire des médecins qui faisaient des sciences cognitives, voire des mathématiciens, et moi j'ai eu mon mot à dire en tant que président, j'ai dit, 'Non, je suis tout à fait pour les sciences cognitives, mais je veux des gens qui travaillent avec les sciences sociales' »[1328].

Toutefois Besnier démissionne assez rapidement. Godelier explique avoir été « furieux » de son choix :

> « Et je m'en rappellerai toute ma vie, je partais en vacance à Noël dans ma voiture et il m'appelle à midi ou deux heures de l'après-midi, ou quelqu'un m'appelle et m'a dit, Besnier a été élu […] trois heures après on me dit, 'Besnier a démissionné'. Il considère qu'il a eu 60% des voix mais qu'il n'était pas assez bien élu parce qu'en fait il avait surtout été élu par des jeunes et des doctorants et que les anciens avaient... Mais imaginez le travail que l'on avait fait pour monter tout cela, réduit à néant, donc je rappelle Besnier […] je lui dis, 'Je te laisse réfléchir le weekend et on se rappelle'. […] Lundi il annonce, 'C'est bon, j'accepte' […] on avait fait le rassemblement général du département […] et je lui demande de venir se présenter […] Donc il arrive et puis je lui explique devant les dizaines de collègues qui étaient là comment cela fonctionne, que voilà il y a une réunion par semaine le mercredi […] et là calmement il me regarde et dit, 'Ah, c'est les réunions le mercredi ? Ah bon, j'ai le cours le mercredi, je démissionne […]' et donc il me laisse le paquet et il s'en va, j'étais furieux »[1329].

Selon Chavalarias, « devenir directeur d'un labo c'est quand même un choix de carrière » et, puisque Besnier était professeur à Paris 4, « peut-être qu'il s'est dit, ça m'intéresse pas de faire tout cet effort »[1330]. Interrogé sur ce point, Besnier nous a donné sa version des faits :

> « très vite je me suis rendu compte que ça serait pas gérable, qu'on y arriverait jamais. Les collègues ont fait savoir qu'ils n'iraient jamais à Palaiseau, donc je me serais retrouvé avec la perspective de gérer un CREA qui aurait perdu toute son

[1327] « [Besnier avait] l'avantage d'être quelqu'un qui pouvait apaiser les tensions et de refaire la dynamique pour lancer le CREA » : entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
[1328] *Ibid*.
[1329] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1330] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

histoire, toute sa mémoire, je n'aurais plus qu'à gérer les jeunes qu'avait rameutés Bourgine. En même temps l'École Polytechnique ne tenait pas ses promesses […] [Elle] avait promis que j'aurais quelques moyens logistiques, comme par exemple un secrétariat administratif […] Et puis je demandais une décharge [de mes enseignements] parce que j'étais prof à la Sorbonne, en tout cas bénéficier des attributs d'un directeur de laboratoire. […] Avoir à disposition du crédit qui me permette de faire fonctionner un laboratoire correctement. Je demandais aussi une petite rallonge de salaire, qu'on m'a refusée. Donc je vois pas pourquoi j'aurais assuré mes enseignements et ma recherche à la Sorbonne avec mon salaire de prof et puis être obligé de gérer un laboratoire, une surcharge en plus. Comme je sentais en plus qu'il n'y avait pas un enthousiasme, bon, je pensais que j'allais ramer, que j'allais essayer de faire un bouche-à-bouche avec le CREA. J'ai démissionné »[1331].

Cette version correspond à la version plus succincte, contenue dans la lettre de démissions que Besnier avait envoyée à Alain Fuchs, président du CNRS, le 31 août 2011[1332]. Dans la lettre que Besnier adressa aux autres membres du CREA, il spécifie davantage sa requête sur le secrétariat et mentionne un argument ultérieur, concernant la réhabilitation de l'enseignement qui fut de Dupuy et de Petitot. Le manque de réponse des tutelles était pour lui le signe du désintérêt de leur part envers le sort du CREA :

« Parmi ces demandes, j'en citerai deux : le remplacement de Marie-José Lécuyer aux meilleures conditions (j'ai établi la fiche de poste d'une attachée de direction, il y a plusieurs mois, sur laquelle je n'ai eu nulle réaction), la remise à disposition pour un membre du CREA du poste d'enseignement qui était traditionnellement attaché au CREA et permettait notre présence dans les instances décisionnelles de l'École (à ce jour, aucune réponse). Ces demandes modestes et non satisfaites sont à mes yeux un symptôme : celui de l'absence d'intérêt que nous recevons des tutelles »[1333].

En outre, Besnier précise qu'il avait démissionné « du Ministère de la Recherche, où [il] occupai[t] la situation enviable de directeur scientifique du secteur Sciences et

[1331] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.

[1332] « Je viens, par la présente, vous soumettre ma démission. Après avoir exploré le contexte scientifique et stratégique de ces fonctions et adressé à l'Ecole Polytechnique, seconde tutelle du CREA, quelques demandes destinées à leur exercice – demandes restées lettre morte-, je considère ne pas disposer des moyens pour assurer la mission que vous avez souhaité me confier. Je ne désire donc pas assurer une direction qui absorberait en vain mon énergie et préfère réintégrer pleinement mes activités d'enseignement à l'Université Paris-Sorbonne. Je vous suis sincèrement reconnaissant pour votre confiance et sollicite votre compréhension pour ma présente défection » : Besnier, J.-M., « Lettre de démissions à Alain Fuchs », 31 août 2011, archives de Jean-Michel Besnier.

[1333] Besnier, J.-M., « Aux amis du CREA le 27-08-11 », archives de Jean-Michel Besnier.

Société, pour engager cette direction du CREA »[1334] ; il est également l'un des rares à avoir mentionné les rapports conflictuels qui opposaient l'École Polytechnique au CNRS. La raison pour laquelle il donna ses démissions la veille de sa prise en charge est liée au manque de reconnaissance de son élection de la part de l'École : il ne voulait pas se retrouver à diriger un centre dans le « collimateur » :

> « J'ai attendu jusqu'au bout le signe de l'École Polytechnique, j'avais écrit, j'avais relancé, j'attendais un signe, un simple signe, même avaliser ma prise de fonction, c'est-à-dire qu'on sache et qu'on reconnaisse que j'avais été élu directeur […] j'avais un papier du CNRS d'Alain Fuchs […] Or l'École Polytechnique et le CNRS étaient en bisbille farouche à l'époque […] il y avait toute une polémique autour de la place que prendrait l'École Polytechnique sur le plateau de Saclay et de la place que prendrait le CNRS. Il y avait une espèce de partage des territoires, il y avait une guerre des chefs […] On aurait été effectivement dans le collimateur, ça planait et il y avait l'idée que le CNRS ou Polytechnique allait lâcher le CREA […] ça nous dépassait largement »[1335].

Besnier dit comprendre la surprise de ses collègues, mais revendique sa volonté de s'« inscrire dans une vraie dynamique » à l'intérieur du plateau de Saclay (qui entre parenthèses est aujourd'hui en crise[1336]), où allait s'installer également l'École des Hautes Études Commerciales (HEC), car il « savai[t] que [le CREA] pouvait être l'interface de tous les départements de sciences humaines et sociales de ces grands organismes, de ces grands écoles, [qu']il y avait quelque chose qui pouvait être extraordinaire »[1337].
En conséquence du refus de Besnier, Petitot relate que l'École Polytechnique et le CNRS ont cherché un directeur *in extremis*. Puisque Longo ne pouvait être que directeur adjoint du fait de sa retraite imminente, Lassègue avait demandé au polytechnicien, mathématicien et philosophe Olivier Rey de candidater, mais celui-ci se refusa :

> « Olivier [Rey], explique Lassègue, ne voulait pas du tout s'occuper de l'administration. Il trouvait que c'était une espèce de panier de crabes terrible, et d'autre part il était déjà en rupture de banc avec l'École Polytechnique, dont il trouvait que la façon de gérer l'enseignement était ridicule, très orientée business et

[1334] Mail de Jean-Michel Besnier, 05.04.18.
[1335] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1336] Stromboni, C., « La Cour des comptes appelle à sortir de l'impasse à Saclay », *Le Monde*, 08.02.2017 : http://mobile.lemonde.fr/campus/article/2017/02/08/la-cour-des-comptes-appelle-a-sortir-de-l-impasse-a-saclay_5076291_4401467.html.
[1337] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.

que c'était pas du tout la Grande École scientifique d'autrefois, celle qu'il avait aimé »[1338].

Lassègue se tourne donc vers Serge Galam, invité au CREA par Bourgine et Petitot au début des années 2000, et lui propose de devenir directeur. Galam relate avoir accepté assez rapidement, dans l'objectif de pouvoir éviter la suppression de cette structure envers laquelle il se sentait reconnaissant[1339].
Le socio-physicien, qui avait pris des positions controversées dans l'espace public sur les sciences du climat, reçoit le support des philosophes et il est même élu à l'unanimité des suffrages exprimés en assemblée générale[1340]. Même si c'était le directeur par intérim qui disposait de la signature, Galam explique que Lassègue était pressé de passer la relève au nouveau directeur :

« Les deux tutelles sont d'accord, trouvent que c'est très bien, et on organise un vote, je ne sais pas, deux jours après, j'ai eu une grande majorité, pas l'unanimité mais une grande majorité […] tout le monde est rassuré, je relance le séminaire interne, j'organise un thé quotidien pour essayer de recréer un peu de lien entre les gens. […] je devais prendre la direction en janvier. Jean [Lassègue], qui n'en pouvait plus […] a voulu que je prenne la direction dès le mois de septembre […] il ne voulait pas attendre la fin décembre »[1341].

Certains ne se souviennent pas positivement de cette courte direction *in pectore*, car ils en critiquent le manque de vision scientifique tout en louant le volet animation, tandis que d'autres en parlent en des termes plus positifs, tel que Skrobek :

« j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec Serge […] parce que c'était un type qui écoutait tous les avis, qui était très intéressé, qui voulait comprendre les processus, et qui assumait parfaitement ses responsabilités, qui disait, 'Si je fais un arbitrage, mon arbitrage c'est ça, et pour telle et telle raison' »[1342].

Alors que l'élection de Galam avait été confirmée par les tutelles, il considère avoir été victime d'« un délit d'opinion »[1343] du fait de son climato-scepticisme ou de ce qu'il

[1338] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1339] Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.
[1340] « Nous on soutenait sa candidature qui était de compromis vraiment, il a dit on va aller à Palaiseau, on va participer à tous les trucs qui vous intéressent, mais on va garder quand même une dimension artisanale pour certains d'entre nous » : Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1341] Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.
[1342] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1343] Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.

qualifie de « climato-exigen[ce] »[1344]. Il critique la réaction des tutelles pour avoir cédé à quelques personnalités brandissant une peur injustifiée[1345]. Selon Petitot également, Galam fut exclu à cause d'interventions jugées « climato-sceptiques »[1346] :

> « Après la démission abrupte de Jean-Michel Besnier, les tutelles se sont arraché les cheveux, en disant 'Qu'est-ce qu'on fait ?' En catastrophe, le centre un peu sous le coup de l'événement, a demandé si quelqu'un pouvait se présenter. Serge Galam s'est dit d'accord. Mais, à cause de ce qu'il avait écrit dans certains grands journaux sur le climat, sa candidature ne passait pas du tout à l'École Polytechnique, et celle-ci a dit 'Non, non, pas question' »[1347].

Si Galam attribue le véto à Dupuy et à Brézin qui a été très actif à l'Académie des Sciences contre les climato-sceptiques[1348], Dupuy nomme plutôt Michel Petit, à l'époque Directeur de l'enseignement et de la recherche à l'X :

[1344] Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.

[1345] « À Polytechnique, il y a eu aussi une ou deux personnes importantes qui étaient extrêmement choquées que je puisse prendre la direction du labo parce que, et là on entrait dans une chasse aux sorcières de type religieux […], j'allais utiliser la position de directeur du labo pour propager le climato-scepticisme, enfin c'est complètement fou. Je n'étais pas l'adepte d'une nouvelle religion hérétique ou je ne sais quoi […], pour la réputation de l'école, d'après eux il n'était pas possible d'avoir un climato-sceptique comme directeur du CREA, mais tout ça évidemment n'a pas été officiel. […] Si ça avait été un labo de climatologie, j'aurais compris qu'on puisse dire, 'On ne veut pas de cette orientation', mais là tout de même, soyons sérieux, je n'allais pas transformer le CREA en labo de climatologie ! [...] c'est complètement aberrant, ça n'avait aucun sens » : entretien avec Serge Galam, 20.01.16.

[1346] Selon Galam, « la climatologie n'est pas encore une science exacte établie, et donc on ne peut rien affirmer au nom de la science en ce qui concerne le 'réchauffement climatique' » : mail de Serge Galam, 24.10.18. Pour lui « il y a des dérèglements climatiques avérés mais leur compréhension est encore loin d'être établie de façon définitive. D'ailleurs il est notable que depuis quelque temps on parle le plus souvent de changement climatique et non plus de réchauffement climatique, signe d'une certaine prudence quant à la nature des modifications en cause » : mail de Serge Galam, 24.10.18. Il soutient surtout « qu'on ne peut pas affirmer que la science a prouvé que la production anthropique de CO_2 est la cause principale de ces changements […] qu'on ne sait pas quelle en est la cause, et s'il existe de fortes présomptions pour que ce soit l'homme, ce n'est peut-être pas lui » : mail de Serge Galam, 24.10.18. Pendant notre entretien, Galam avait exprimé ses craintes par rapport au discours du GIEC : « En science 99% d'indices ne font pas une preuve et en fait c'est au nom de leur conviction, qui certes n'est pas illégitime en soi, que les scientifiques sont en train de générer une attitude de type religieux sur cette question en confondant conviction profonde et preuve scientifique. C'est très dangereux et ça peut mener à une nouvelle forme de totalitarisme, il faut faire très attention […], je suis très sensible à cette question du totalitarisme, des dérives communistes et aussi des dérives nazies, enfin de comment on arrive à mettre en place des systèmes qui exterminent des millions de gens au nom d'une cause préalablement identifiée comme l'origine de tous les maux d'une société […], je suis convaincu du fait que non seulement la fin ne justifie pas les moyens, mais que dès qu'on commence à manipuler la réalité pour le bien d'une cause, c'est cuit pour cette cause et les gens qui vont être concernés » : entretien avec Serge Galam, 20.01.16. Voir aussi : Galam, S., « Pas de certitude scientifique sur le climat », Le Monde, 07.02.07 ; Verney-Caillat, S., « On ne peut pas prévoir comment va évoluer le climat », entretien avec Serge Galam, Rue89, 07.11.09 ; Galam, S., Les scientifiques ont perdu le nord : réflexions sur le changement climatique, Paris, Plon, 2008.

[1347] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1348] Pour être plus précis : Galam attribue à Dupuy le fait d'avoir œuvré pour empêcher sa nomination, mais selon lui c'est finalement Brézin, président du Conseil de l'enseignement et de la recherche de l'École Polytechnique, qui aurait réussi à imposer le véto de sa nomination à Xavier Michel, le directeur général de l'École, qui allait prendre sa retraite quelques mois plus tard : entretien avec Serge Galam, 20.01.16. David Chavalarias dément ce point à propos de Dupuy : « Dupuy s'est toujours refusé d'intervenir en tant qu'ancien

> « Michel Petit fut, dans toute cette période et au-delà, le principal membre, aux côtés de Jean Jouzel, de la section française du GIEC […] Inutile de dire que c'est lui qui a barré la route du climato-sceptique Serge Galam, alertant un par un chacun des membres du Conseil d'administration »[1349].

Si Dupuy confirme avoir été opposé à l'élection de Galam comme directeur, c'est moins pour le climat que pour des raisons scientifiques et administratives. Petitot, quant à lui, explique que c'était une affaire de spécialistes du climat interne à l'École Polytechnique : « Polytechnique est un des hauts lieux des études sur la climatologie en France. Comme Galam n'est pas un spécialiste du climat, il y a eu un conflit avec de vrais spécialistes et des gens très haut placés »[1350]. Pour Petitot – qui donne raison au GIEC mais qui comprend l'attaque de Galam vis-à-vis de ce que les deux appellent l'« idéologisation du problème du climat »[1351] – il n'y aurait sans doute pas eu de problème avec l'élection de Galam, si celui-ci n'avait pas publié de textes climato-sceptiques. D'ailleurs, Galam souligne le fait que :

> « À aucun moment, aucun des protagonistes à la manœuvre pour faire capoter ma nomination, n'a demandé à parler avec moi d'éventuels problèmes ou obstacles, tout se passait dans mon dos et c'est essentiellement Lassègue qui m'informait des coups bas des uns et des autres. Évidemment personne n'allait dire officiellement que j'avais commis un délit de croyance et il a bien fallu trouver d'autres arguments »[1352].

Toutefois, Godelier minimise ce point et attribue plutôt l'affaire aux recherches en sociophysique de Galam : « C'est vrai que le conseil d'enseignement de recherche a un

---

directeur. Parce qu'il considérait qu'il fallait que le truc se prenne en charge tout seul. En plus Dupuy est illichien, il adhère à cette idée que si une institution a fait ses dix ans, il vaut mieux qu'elle s'arrête quand elle est au top, plutôt que de chercher à perdurer absolument » : entretien avec David Chavalarias, 23.03.16. En même temps, Besnier dit que si Dupuy n'intervenait pas, il n'y était pas non plus indifférent : « On a eu trois dîners, Petitot, Dupuy et moi, une fois il y avait aussi Giuseppe Longo, à Montparnasse. On tenait des réunions stratégiques pour essayer d'imaginer les moyens de sauver le CREA […] [Dupuy et Petitot] des hommes très courtois, très loyaux, esprit de corps aussi : l'École Polytechnique avant tout » : entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.

[1349] Mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18.

[1350] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1351] Selon Petitot « Galam a raison sur ce point, il y a une sorte d'idéologisation du problème du climat et donc une certaine violence idéologique. Mais, en même temps, tous les résultats du GIEC sont sans doute essentiellement vrais. Là où Galam a raison c'est qu'il voit très bien que la question est aussi instrumentalisée pour faire changer des comportements. Il ne s'agit alors plus d'un problème de climatologie mais d'un problème moral. […] Il ne faut pas forcément changer les comportements pour sauver le climat. On peut se tourner vers l'ingénierie climatique comme l'a proposé Paul Crutzen, spécialiste de chimie atmosphérique, Prix Nobel 1995 pour ses travaux sur le trou d'ozone. Personnellement, je suis assez favorable au génie climatique même si la plupart des scientifiques sont farouchement contre et que les écologistes ne veulent pas en entendre parler » : entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1352] Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.

peu dit cela [que Galam était climato-sceptique], mais ce n'était pas cela l'élément essentiel. […] on a dit que la scientificité de ses modèles et les passages de physique statistique n'étaient pas sérieux et il y a eu des évaluations et voilà »[1353]. Selon Sandra Laugier, à l'époque directrice adjointe à l'Institut des Sciences Humaines et Sociales du CNRS, le refus de Galam était lié à son projet scientifique, jugé insuffisant[1354]. Sur ce point, Galam tient à remarquer que son projet était celui d'un collectif impliquant de nombreux membres du CREA et deuxièmement que tel projet avait été validé par le CNRS et qu'il ne manquait plus que l'aval de l'École Polytechnique[1355].

Et si les philosophes partaient ?

Comment Bourgine a-t-il pensé gérer le pôle philosophique ? Nous avons vu que Bourgine avait proposé aux philosophes de travailler à une épistémologie des systèmes complexes. Dès lors que cette tentative d'enrôlement ne marchait pas, fallait-il envisager leur départ ? Petitot n'avait plus de responsabilités mais se demandait si le déménagement à Palaiseau n'allait pas inéluctablement conduire à cette conclusion[1356]. Comme le témoigne Sarti :

> « Je me souviens d'avoir entendu dire Petitot que le CREA devait faire le choix qu'il avait fait dix ans auparavant à l'époque de Dupuy, lorsque les philosophes analytiques se séparèrent du CREA ; et qu'en cette circonstance-là il fallait faire le même choix : les modélisateurs des systèmes complexes devaient aller à Palaiseau sans le reste du laboratoire »[1357].

Selon le témoignage de Piotrowski, « lorsqu'il y a eu le virage [du CREA vers les SSC] […] nous on n'avait plus vraiment d'échange avec Petitot »[1358]. D'une part, Petitot pense que le divorce entre les deux sous-groupes était dû à l'avantage du numérique sur le mathématique (« contre lequel on ne peut rien »[1359]), en dépit du fait que ce dernier avait jusque-là fonctionné de charnière entre les équipes. D'autre part, Petitot a confirmé en partie la version de Sarti :

> « Je trouve que les tutelles auraient dû, à ce moment-là, couper le centre en deux, en disant à ceux qui voulaient aller à Palaiseau faire de la modélisation computationnelle 'Allez-y', et à l'autre partie qui voulait rester à Paris 'On vous

[1353] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1354] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[1355] Mail de Serge Galam, 24.10.18.
[1356] Mail de Jean Petitot, 14.09.18.
[1357] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1358] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1359] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

met sous une autre tutelle dans un autre centre'. C'est d'ailleurs en définitive un peu ce qui s'est passé »[1360].

Cette idée était une option lors de la controverse, comme le témoigne Petitot : « On garde la tutelle CNRS, on renonce à la tutelle École Polytechnique, et on prend pour nouvelle tutelle par exemple Paris 7. Cette option a été débattue parce qu'il y avait des membres associés du CREA qui étaient à Paris 7 »[1361]. Galam explique que les négociations s'étaient poussées assez loin, en repérant aussi les futurs bureaux du centre :

« avec Jean [Lassègue], on a contacté plusieurs présidents d'université […] Et on est tombés d'accord [avec le président de Paris 7] pour intégrer l'université dans ses locaux à Tolbiac […] Il y avaient des locaux dans un nouveau bâtiment qu'ils devaient réceptionner en septembre et donc on devait avoir 200, 250 mètres carrés, là »[1362].

Dans un mail postérieur à une première version de ce chapitre, plusieurs de nos interlocuteurs nous ont donné les détails de cette « phase finale » :

« Dans cette phase, un dernier projet avait été proposé pour sauver le CREA, porté donc par Serge. Il avait recueilli l'unanimité des votes exprimés lors de l'assemblée générale de désignation, avait ensuite été validé par les deux tutelles (CNRS et l'X) et pourtant il s'est heurté à un refus de dernière minute, non explicitement motivé, de la part du Général directeur de l'X. Devant ce refus laconique, la Direction du CNRS avait décidé de prolonger la Direction par intérim de Serge de façon à laisser le temps de rechercher (toujours sous sa direction) une autre deuxième tutelle (qui ne serait donc plus l'X !). Des contacts favorables avaient été noués en ce sens avec Paris 7 »[1363].

Les auteurs de ce mail tiennent à souligner que le même projet scientifique, présenté par Galam à l'École Polytechnique et au CNRS, avait été retenu par un autre organisme (Paris 7), ce qui contredit selon eux l'idée selon laquelle le CREA a été supprimé en raison de la faiblesse du projet présenté par Galam. Selon eux, la raison ultime réside dans une décision de Polytechnique.
Skrobek explique que le changement de tutelle ne s'est pas fait pour une raison procédurale « bête », car après que Paris 7 avait manifesté son intérêt pour la venue du

[1360] *Ibid.*
[1361] *Ibid.*
[1362] Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.
[1363] Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.

CREA, « [i]l n'y a eu aucun écho. Ça n'avait pas été mis à l'ordre du jour parce que la personne qui préparait l'ordre du jour ne l'avait pas intégré. Parfois c'est des trucs aussi bêtes que ça. Donc on se retrouve avec une échéance beaucoup plus longue »[1364]. Galam attribue la faute

> « au mauvais timing avec la fin du mandat du président de Paris 7 et au choix du conseil de ne pas prendre de décision sur une question aussi importante pour Diderot lors de sa dernière session. Le conseil décida de laisser cette décision à la nouvelle direction qui ne sera installée que plusieurs mois plus tard »[1365].

Chavalarias considère que « ce n'était pas vraiment la meilleure manière de montrer à X que le CREA avait envie de rester »[1366]. Après la dissolution, Petitot et d'autres membres du pôle SSC essayèrent de refonder à l'École Polytechnique un centre de style CREA.

Quid des tutelles ?

Il reste à se demander quels étaient les points de vue des tutelles du CREA. Lassègue nous explique que tant l'École Polytechnique que le CNRS ne voulaient pas couper totalement les sciences de la nature des sciences de l'homme, les premières bornées dans le plateau de Saclay et les secondes dans le plateau de Condorcet :

> « C'est parce que le plateau de Saclay était en train de se monter et qu'ils voulaient quand même qu'il y ait sur ce plateau une réflexion épistémologique, théorique, philosophique qui demeure, alors qu'il était question à l'époque qu'il y ait un grand campus sciences humaines dans le nord de Paris. Je pense qu'à ce moment-là le CNRS s'est dit, on ne peut pas séparer aussi brutalement les sciences d'un côté, les humanités de l'autre, et il y a un groupe de types là qui pourraient un peu servir de liaison. C'est un discours que j'ai entendu à l'époque »[1367].

Godelier explique que Laugier avait « beaucoup poussé [pour garder le CREA], parce qu'elle voulait développer les sciences cognitives et aussi un peu de complexe[1368] et, comme elle est philosophe de formation, elle ne voulait pas que ce soit n'importe

[1364] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1365] Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.
[1366] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1367] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1368] Laugier explique : « même si [cela risquait de porter attente au CREA], et que ça m'ennuyait parce que j'avais beaucoup d'amis au CREA qui étaient contre, c'est vrai que je me suis dit que ce développement des systèmes complexes c'était vraiment l'avenir pour le CNRS et les SHS. Et ça Bourdelais il y a jamais vraiment cru […] c'est pour ça qu'il s'est pas énormément investi, ça s'est fait petit à petit » : entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.

quoi »[1369]. Doursat arrive à définir la fonctionnaire du CNRS comme « le casque bleu de l'ONU », « une femme excellente et formidable qui a essayé de mener une thérapie de groupe et nous réconcilier »[1370]. En même temps, interrogée, elle dit que le CNRS n'était pas à tout prix attaché au CREA, « parce qu'au CNRS ce qu'on veut c'est que la recherche se fasse. On est pas attaché à une équipe ou à une autre »[1371]. Cela dit, un élément ultérieur semble avoir complexifié le tableau.
Chavalarias est, avec Besnier, l'un des rares à avoir mentionné le fait qu'« à l'époque CNRS et Polytechnique ne s'entendaient pas trop » [1372]. Laugier donne quelques éléments de plus sur cet aspect, qui font comprendre pourquoi le CNRS n'a pas œuvré pour que le CREA soit maintenu à tout prix :

> « L'X[1373] a été très hésitante depuis un certain nombre d'années à réellement s'investir dans la recherche, puisque c'est une école plutôt de formation. Ils se sont un peu retirés de la recherche fondamentale pour plutôt avoir Finkielkraut, des figures plutôt médiatiques […] C'étaient plutôt des configurations globales, ce qui fait que l'X [n']a plus été un partenaire scientifique pour le CNRS. L'X ne mettait pas la recherche en priorité et le CNRS ne peut pas s'entendre avec une institution qui met pas la recherche en priorité. C'est pour ça que le CNRS s'est pas très battu pour maintenir la collaboration avec l'X. […] On se retire progressivement de l'X »[1374].

En ce qui concerne l'École Polytechnique, plusieurs interviewés ont eu l'impression que cette tutelle ne voyait pas de bon œil le CREA et qu'elle aurait préféré le garder à condition qu'il soit transformé. Visetti par exemple critique le fait que Eric Godelier, directeur des SHS à l'École Polytechnique, « ne s'intéressait pas spécialement au projet du CREA […] il voyait plutôt sans doute les SHS dans la future École Polytechnique comme quelque chose qui réponde aux grands défis de la mondialisation, la philosophie du management »[1375]. Lassègue rajoute que Godelier « né de la gestion », « voyait d'un très bon œil l'espèce de virage de Polytechnique vers HEC[1376], vers une école un peu marketing » : dans tout cela, selon Lassègue la philosophie et l'épistémologie n'étaient pas la priorité pour Godelier[1377]. Pour renforcer ce point, Lassègue cite aussi l'affaire de la candidature d'Olivier Rey à l'un des deux demi-postes d'enseignant du CREA et à la direction du CREA. « Olivier Rey, polytechnicien, mathématicien, philosophe et romancier […] était, selon

[1369] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1370] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
[1371] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[1372] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1373] X est un surnom de l'École Polytechnique.
[1374] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[1375] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1376] Hautes Études Économiques.
[1377] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

Lassègue, vraiment l'homme de la situation. Godelier a refusé sa candidature […] Olivier a dit, 'Bon j'ai compris, l'École Polytechnique n'est plus cette école-là […] je m'en vais' »[1378].

Nous avons sollicité Olivier Rey pour un entretien. Il a répondu par un mail dans lequel il nous explique que, à peine arrivé au CNRS après une conversion des mathématiques à la philosophie, il avait « envie de [s]e consacrer pleinement aux travaux qu[']il avai[t] en tête et, pour cette raison, [il] ne pouvai[t] envisager [s]e consacrer à la direction du CREA »[1379], d'autant plus que la fracture entre les deux groupes lui paraissait impossible à réconcilier. Quant au barrage que Godelier lui aurait fait pour éviter qu'il ne prenne le poste de professeur, selon Rey le premier craignait l'arrivée du CREA à Palaiseau « à moins que le laboratoire ne s'oriente exclusivement vers les neurosciences »[1380]. « La disparition du CREA, continue Rey, lui a permis, en revanche, de constituer sous son contrôle le LinX »[1381], pour lequel le philosophe n'a pas des mots d'estime. Il revendique avoir trouvé par la suite un environnement plus stimulant à l'IHPST de la Sorbonne.

Godelier, quant à lui, se disait en désaccord avec le projet de naturalisation des SHS du pôle modélisateur du CREA, projet qu'il qualifie de « réactionnaire »[1382], mais ne dément pas la version de Visetti, Lassègue et Rey sur le virage de l'École Polytechnique vers des SHS appliquées. Lorsqu'il fut recruté par l'École Polytechnique, Godelier avait comme mission de suivre les indications contenues dans la réforme de Jean-Louis Beffa, ancien PDG de la multinationale Saint Gobain et ancien administrateur de l'École Polytechnique, qui prônait le développement « des approches un peu plus orientées vers la vraie vie, vers la vie économique et notamment vers l'entreprise »[1383] :

> « Olivier [Rey] […] a[vait] enseigné un petit peu chez nous et quand justement on a créé ce poste qui était la séparation du poste de Dupuy, il a candidaté et en fait il a été assez sûr d'avoir le poste […] Intellectuellement c'est quelqu'un de brillant et d'intéressant mais il a fait une prestation [orale] qui n'était pas super et surtout à l'époque moi je souhaitais avec le département que l'on rapproche – parce que c'était une demande de l'École – […] les enseignements des laboratoires. […] [car] cela fait des doctorants […] pendant très longtemps, les SHS ici étaient plutôt des humanités […] un peu de sciences sociales […] En gros les polytechniciens c'est bien qu'ils connaissent un peu d'art, un peu de philosophie, de littérature, il faut de beaux esprits au sens du XVIII^{ème} siècle […] Moi quand j'ai été recruté […] l'idée c'était de développer quelque chose un peu plus scientifique […] Les sciences

[1378] *Ibid.*
[1379] Mail d'Olivier Rey, 09.03.17.
[1380] *Ibid.*
[1381] *Ibid.*
[1382] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1383] Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.

> sociales comme étant un développement des méthodologies et des concepts qui permettent de penser le monde et d'agir sur lui […] pendant une dizaine d'années moi j'ai développé l'idée que l'on allait rééquilibrer un peu plus vers des labos avec une approche empirique. Olivier Rey c'était plutôt la première approche, plutôt des concepts »[1384].

Si d'autres chercheurs sont convaincus que Godelier n'était pas très favorable à la venue du CREA à Palaiseau, Godelier lui-même a tenu plusieurs fois à souligner son engagement pour rapatrier les laboratoires SHS dans les meilleures conditions (« je me suis beaucoup bagarré pour les sciences sociales »[1385]), à condition que ceux-ci – le CREA, le Centres d'Économétrie, ainsi que le Centre de Recherche en Gestion – présentent un projet commun à cinq ans devant l'instance du Conseil d'enseignement et de recherche, qui évalue et donne un avis sur la politique scientifique de l'École Polytechnique. Lorsque le CREA présenta le sien, il proposa quatre équipes différentes avec quatre projets différents : « La direction a dit, 'On ne voit pas le projet scientifique commun. On voit des sous-équipes mais qu'est-ce qui fait que dans les cinq ans ou dix ans à venir, vous vous développez autour d'un axe ?' »[1386]. Godelier relate aussi qu'Edouard Brézin, président du Conseil d'enseignement et de recherche, critiquait Serge Galam et la place que ses recherches avaient dans le projet d'un point de vue scientifique[1387]. Godelier dit avoir prévenu les laboratoires qui devaient déménager sur le plateau de bien se préparer à l'épreuve : « Moi j'ai fait passer des messages, un peu au CRG mais surtout au CREA, en disant : 'Faites gaffe, préparez bien vos trucs' »[1388]. Il aurait reçu en réponse, de la part du CREA, la requête d'écrire une lettre à la ministre Valérie Pécresse pour la convaincre de renoncer aux locaux de la Montagne Sainte-Géneviève. Lorsqu'il y eut la présentation du projet du CREA, Godelier relate que la première diapositive commençait avec la phrase suivante : « que peut faire l'École Polytechnique pour le CREA ? »[1389], face à quoi il dit avoir vu « la tête du Président du conseil devenir verte »[1390] et avoir reçu le Directeur de l'École Polytechnique, Xavier Michel à l'époque, qui lui aurait dit : « voilà, tiens ! Et tu les as prévenu là. C'est fou, ils vont mourir »[1391]. À ce propos, dans le mail collectif en réponse à la première version de ce chapitre, nous lisons que

---

[1384] *Ibid.*
[1385] *Ibid.*
[1386] *Ibid.*
[1387] En fait, Besnier nous a raconté que les critiques de Brezin étaient plus larges que cela et s'adressaient aux SSC en général : « Eduard Brezin […] considérait que les sciences de la complexité c'est une imposture, qu'il n'y avait pas de complexité, que c'était une espèce de dérive mystique de la science, qu'on était dans l'irrationalisme, donc très très opposé aux problématiques du CREA » : entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1388] Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
[1389] *Ibid.*
[1390] *Ibid.*
[1391] *Ibid.*

« Galam précise que si effectivement sa première diapositive comportait bien 'que peut faire l'École Polytechnique pour le CREA ?' elle comportait aussi la phrase complémentaire 'que peut faire le CREA pour l'École Polytechnique?'. C'est justement parce qu'il avait un projet scientifique pour l'intégration du CREA aux activités de l'École Polytechnique qu'il avait voulu insister sur la nécessité d'un échange gagnant-gagnant pour que le transfert soit un succès car sinon la quasi-totalité des chercheurs du CREA ne voyait aucun intérêt à aller chaque matin s'isoler sur le plateau et le CREA y serait devenu une coquille vide »[1392].

Dans l'extrait suivant, Godelier reporte la réaction du CREA à la nouvelle de la fermeture et revendique avoir fait de son mieux pour un centre qui avait selon lui du potentiel :

« [Le] président du conseil [a] dit, 'Bon, je crois que c'est clair, je demande la dissolution du CREA au CNRS'. Et donc c'était arrivé aux oreilles du CREA, moi j'en ai eu plein la tête parce que l'on m'a dit, 'Tu ne m'as pas aidé' […] [Et j'ai répondu,] 'Je vous ai expliqué depuis des mois ce qu'il ne fallait pas faire, vous ne l'avez pas fait, oui il faut prendre ses responsabilités ; j'ai pris ma responsabilité mais vous pas'. Ce qui est dommage parce que [c']était un beau laboratoire, […] un endroit où il y avait des choses à faire »[1393].

Dupuy, dans un mail suivant la relecture d'une première version de ce manuscrit, considère que, de façon générale, nos interviewés sous-estiment l'importance du rôle de l'École Polytechnique dans toute cette affaire :

« Je note que la plupart des gens que vous avez interviewés n'ont jamais mis les pieds, au sens propre et au sens figuré, sur le campus de Palaiseau. […] Ces faits sont significatifs de ce que fut la principale faiblesse du CREA : son éloignement, tant géographique que fonctionnel, de son Alma Mater »[1394].

Dupuy relate que la « création du CREA en 2002 a été concomitante d'une véritable révolution au sein de l'École Polytechnique : la reconnaissance d'une égale dignité entre les activités d'enseignement et les activités de recherche »[1395]. Ceci aurait renforcé la loi Chéradame (du nom d'un ancien Directeur de l'enseignement et de la recherche de l'X), une règle en vigueur depuis longtemps qui établit que seulement les

[1392] Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.
[1393] Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
[1394] Mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18.
[1395] *Ibid.*

professeurs « au sens strict »[1396] ont le droit et « sont encouragés à concentrer leurs activités de recherche au sein de l'École et, pour ce faire, d'y monter leur propre centre de recherches »[1397]. Domenach et Dupuy ont pu fonder le CREA parce qu'ils étaient professeurs à l'École Polytechnique, tandis que Paul Dumouchel, qui avait contribué à rédiger la charte du CREA, « n'a pu jouer aucun rôle officiel, étant donné sa non-appartenance au corps enseignant de l'X »[1398]. Tout cela est important aux yeux de Dupuy pour comprendre les raisons de l'échec des stratégies mises en place dans la phase finale de l'histoire du CREA : selon lui, c'est le manque de connaissance de la directive Chéradame qui a fait agir ses successeurs à l'inverse de ce que la logique de l'École Polytechnique leur imposait. C'est la direction de cette dernière qui, d'après lui, nomme un directeur et lui demande de prendre en charge le CREA – l'exception de Bourgine, chercheur au CEMAGREF, qui devient directeur du laboratoire aurait, selon Dupuy, suggéré l'idée que cette règle ne valait plus, malentendu qui pour lui représente rétrospectivement le début de la fin. Pour le philosophe, « le rapport de force et de droit » n'allait pas dans le sens du CREA vers l'École Polytechnique, mais en sens inverse, la question que les membres du laboratoire aurait dû selon lui se poser étant : « qu'est-ce que le CREA peut apporter à l'École, non seulement au plan de la recherche mais à celui de la mission principale de l'École : l'enseignement »[1399]. En définitive, pour Dupuy, c'est surtout le manque de connaissance des règles de l'École Polytechnique, de la part de la dernière garde du CREA, qui a causé son délitement, plus que les autres causes apportées par nos interviewés.

La fin de l'histoire

Devant l'impasse représentée par l'incompatibilité des deux pôles du CREA, pourtant pas si étanches et nettes, l'École Polytechnique retire sa tutelle au laboratoire et, puisque le CNRS n'admet pas d'UMR sans tutelle[1400], le laboratoire fondé par Dupuy est dissout. L'annonce est faite en avril 2012 devant une assemblée décrite par beaucoup comme en état de choc et traversée par un climat funèbre. Galam avait refusé la proposition de Bourdelais de prolonger son intérim de six mois et ne l'avait accepté que pour trois mois, le temps de finaliser un accord avec Paris 7. À sa place fut mis le délégué régional du CNRS, Gilles Traimond, qui suivit l'abandon des locaux de l'ENSTA en juillet et resta en charge jusqu'à la dissolution du laboratoire le 31

[1396] « Plusieurs années plus tard, les maîtres de conférence se sont appelés 'professeurs chargés de cours'. Comme ce nom était trop long, beaucoup ont laissé tomber le 'chargés de cours' et se sont fait appeler 'professeurs' tout court. Aimable tricherie, qui ne leur a pas permis pour autant d'acquérir le droit de créer leur propre centre de recherches » : *ibid.*

[1397] *Ibid.*

[1398] *Ibid.*

[1399] *Ibid.*

[1400] Le CNRS n'aurait pas pu retirer sa tutelle car, comme l'explique Sandra Laugier, la plupart des membres du CREA étaient afférents au CNRS : « C'était quand même difficile pour le CNRS de retirer sa tutelle, dans la mesure où il y avait essentiellement des chercheurs CNRS dans cette unité. On peut retirer notre tutelle quand il y a par exemple plein d'enseignants-chercheurs. […] De X il y avait peu de gens, pour eux ça changeait rien du point de vue des ressources humaines » : entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.

décembre 2012[1401]. Suite à cela, les membres, ainsi que les matériaux, furent déplacés à plusieurs endroits. Quant aux chercheurs du CNRS, soit ils furent réaffectés (certains sont passés à l'Institut Marcel Mauss ou au CAMS de l'EHESS, ou au laboratoire Pays Germaniques de l'ENS, ou encore au CEVIFOP de Sciences Po), soit ils ont été installés d'office à Palaiseau. Quant aux membres de Paris 7, certains ont été affectés au laboratoire Sphères.

L'affrontement destructeur entre deux mondes coproduits

Essayons maintenant de mettre un peu d'ordre dans cette histoire « pleine de bruit et de fureur », en disant d'emblée que l'affaire de la fermeture du CREA est au fond descriptible comme l'affrontement destructeur de deux mondes inconciliables – celui du pôle humaniste et celui du pôle modélisateur, chacun s'enorgueillissant à la fois d'une vision épistémique, métaphysique et idéologique précise et cohérente. Dans l'histoire du CREA, toute vision épistémique a immédiatement un penchant institutionnel, idéologique et de politique scientifique, même si les protagonistes érigent des frontières en séparant des phénomènes inséparables[1402]. La distinction entre « interne » et « externe », intéressante en tant que symptôme, est toutefois aussi peu explicative des phénomènes dans leur ensemble que la recherche d'une seule cause qui serait plus importante que toutes les autres. En effet, s'il est inutile d'attribuer la « faute » de la fermeture du CREA à tel ou à tel membre ou pôle ou institution, c'est moins par principe de symétrie que par une reconnaissance de l'entrelacement inextricable des causes en présence. La section précédente a énuméré les différents éléments de controverse que nos interviewés nous ont cités, chacun suggérant ses priorités. Dans la présente, nous décrivons les éléments qui nous semblent déterminants et nous offrons notre lecture des événements, en redonnant la parole aux interviewés pour un nombre réduit de points essentiels.

L'interne et l'externe

D'une part, Bourgine et Petitot, chacun pour des raisons différentes, considéraient le rapatriement demandé par l'École Polytechnique du CREA à Palaiseau comme une obligation mais pensaient qu'il pouvait être une opportunité scientifique voire même un avantage stratégique. D'autre part, une partie des doctorants et postdoctorants de

[1401] Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.

[1402] Petitot par exemple, dans sa relecture à une première version de ce chapitre, tient à préciser qu'« il n'est pas exact de penser l'histoire du CREA en termes politiciens, comme si des communautés s'étaient trouvées forcées malgré elles à cohabiter dans un même espace » : mail de Jean Petitot, 14.09.18. Il ajoute : « Les chercheurs du CREA se sont toujours volontairement regroupés pour relever des défis scientifiques exigeant une interdiscipline 'intrinsèque'. Le problème est que l'interdiscipline 'intrinsèque' est en partie incompatible avec les identités disciplinaires institutionnalisées. Pour pallier cette difficulté, les chercheurs ont dû trouver des stratégies alternatives et celles-ci les ont naturellement conduits à participer à des mondes très différents », mail de Jean Petitot, 17.10.18.

Bourgine, et surtout les philosophes du CREA, se refusaient d'y aller, à la fois pour des raisons intellectuelles et stratégiques (perte d'un lieu « carrefour ») que politiques (opposition à la « science sur projet »). Dans sa lecture de ce point, Sarti unit les deux volets et érige une frontière entre l'intérieur du CREA et son extérieur :

> « Pour comprendre la fin du CREA on ne doit pas oublier que le contexte externe a changé complètement. Que l'École Polytechnique est en train de subir une restructuration interne très forte, qui va dans la direction de l'université-entreprise, à l'américaine, qui mise beaucoup sur l'informatisation, sur l'objectivation […] Il y a un différend épistémique et en même temps les conditions contextuelles rendent ce différend insoluble […] »[1403].

Godelier va dans le même sens que Sarti. Après avoir comparé les deux factions du laboratoire aux couples qui cohabitent mais qui ne se parlent plus, il attribue aux conditions externes l'origine de l'explosion interne :

> « ils n'ont pas voulu en interne avoir le débat puisque c'est des gens qui ne parlaient plus. C'est comme les vieux couples, ils se disaient 'Bonjour, Bonsoir', ils prenaient le café ensemble et regardaient la télé chacun de leur côté et puis ils étaient sous le même toit, mais ils ne se parlaient pas. Donc au fond il y a eu un événement extérieur – moi je suis un spécialiste en organisation, c'est assez classique – et tout s'est révélé. […] il y a eu des jeux de personnes pour récupérer le CREA et résultat : tout le monde a perdu »[1404].

Les « visions » de Petitot et de Bourgine

Revenons aux figures de Petitot et de Bourgine. Nous avons vu que, selon les philosophes, sous la direction de Petitot un certain pluralisme avait été garanti. Or, Sarti n'est pas le seul à donner un poids fondamental à la question du rapatriement du CREA à Palaiseau et au contexte du renouvellement de l'École Polytechnique, et à en offrir une lecture si explicitement politique. Les philosophes nous ont raconté un changement qu'ils auraient perçu chez Petitot, lorsque Bourgine a commencé à décrocher des financements importants. Visetti le résume ainsi :

> « [le] jugement [de Petitot] sur Bourgine a complètement changé dès le moment que celui-ci a obtenu tout ce succès avec les systèmes complexes. Un jugement réfléchi, pas un jugement médiocre […] Il y a [chez Petitot] une conviction de politique scientifique forte. […] il a une vision […] Quand il était directeur, il a vraiment perdu beaucoup de temps pour la direction, pour les autres, très altruiste, parce qu'il

[1403] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1404] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

a estimé que […] ce projet scientifique collectif était très important […] Et il était un animateur de l'esprit collectif du CREA remarquable. Il était à chaque séminaire du CREA, il animait, c'était très sympa. Une époque idyllique et de haut niveau. Mais ça a commencé à se gâter quand il n'était plus directeur, quand il s'est focalisé sur ses propres objets et que Bourgine a eu tout ce succès. Ça a créé une espèce de précipitation, de cristallisation terrible chez lui. Il ne s'est plus intéressé à ce qu'on faisait ailleurs »[1405].

Petitot insiste quant à lui sur le fait qu'il s'était mis en retrait pour se consacrer entièrement à ses recherches personnelles[1406] mais qu'il pensait qu'avec Bourgine le CREA pourrait mettre en place un avenir compatible avec l'obligatoire déménagement à Palaiseau.
Pour Chavalarias, Bourgine voyait le rapatriement à Palaiseau plus comme une opportunité que comme une gêne, tandis que la « science sur projet » créait des difficultés aux représentants des SHS :

« Cette différence de perspective [entre le pôle philosophique et le pôle modélisateur] était aussi alignée avec le côté Big science, Slow science, c'est-à-dire qu'autour de Paul [Bourgine] il y avait beaucoup d'activités et Paul a toujours des visions, des projets pharaoniques. C'est à la fois sa qualité et son défaut : il voyait Palaiseau comme une opportunité de développer le centre [CREA] […] En gros, la science sur projet, si tu veux faire un projet à 10.000 euros, tu ne les trouves pas. C'est les SHS qui souffrent le plus de cette science sur projet parce que ça ne correspond pas à leur culture et à leurs besoins »[1407].

Et Besnier d'ajouter les affinités électives entre, d'une part, l'esprit entrepreneurial de Bourgine et son désir de fonder un institut de la complexité, et d'autre part le changement socio-économique de l'université française :

« Paul est une espèce de *money maker*, un homme qui sait où aller chercher l'argent, et très très vite il a eu une direction tout à fait dans le vent aujourd'hui, c'est-à-dire un laboratoire qui doit trouver de l'argent, qui doit répondre à des appels à projets, qui doit faire des appels à manifestations, qui doit être positionné à l'international à l'occasion des partenariats, Santa Fe, etc. Il a pris très au sérieux cette direction et il

[1405] *Ibid.*
[1406] Les sujets d'étude de Petitot sont la morphodynamique, la neurogéométrie, la phénoménologie, la sémio-linguistique et la philosophie transcendantale. Il tient à le préciser car ses « recherches personnelles n'ont jamais été du côté computationnel et on fait croire l'inverse » : mail de Jean Petitot, 17.10.18.
[1407] « Paul a toujours dit, il faut avoir les deux. Paul c'était pas du tout dans son idée de mettre tout le monde sous la science sur projet. C'est juste que pour ce qu'il voulait faire lui, il y avait besoin de faire la science sur projet, c'est tout » : entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

a voulu impulser une dynamique entrepreneuriale qui était en phase avec l'évolution de l'université à l'époque »[1408].

À propos de Petitot, Lassègue ajoute que son revirement en direction du projet de Bourgine « s'est passé au même moment où des décisions ont été prises de faire de Saclay un grand pôle scientifique de taille européenne »[1409]. Selon Visetti, « ça l'a électrisé »[1410]. Lassègue soutient que « Petitot l'a souhaité, a voulu que le CREA entre là dedans à fond, et ça exigeait un changement de taille et la seule personne qui ait fait ce changement était Bourgine »[1411]. Et il continue : « [Petitot] a vu que Bourgine pouvait gérer des très grands projets et que ces grands projets c'est ça dont on avait besoin pour intégrer l'École Polytechnique à l'immense plateau de Saclay ; il s'est dit, on en a pour quinze ans »[1412].
Galam arrive à minimiser le poids de l'hostilité des philosophes vis-à-vis des SSC en tant que telles, par rapport au poids, selon lui bien plus grand, qu'avait à leurs yeux le déséquilibre politico-financier dû à l'ISC-PIF. Galam, qui a exprimé des réserves quant aux SSC, donne un avis personnel qui ne s'écarte presque pas de celui de Bourgine, au sens où tous les deux veulent les soutenir. Si Bourgine est un militant de ce domaine depuis longtemps, Galam y voit plutôt une entité utile pour chapoter des expériences scientifiques sans maison :

> « même de la part des humanistes, je n'ai pas eu le sentiment qu'ils étaient contre les systèmes complexes. Ils étaient contre le fait que l'Institut des Systèmes Complexes… tout ce qu'a fait Bourgine, c'est une grande réussite, mais c'était trop gros, c'est comme une multinationale qui est hébergée dans une entreprise familiale. Forcément, ça ne peut pas marcher. Ça ne va pas comme situation. Moi je disais que finalement c'était bien de gérer et d'avoir cette multinationale-là, beaucoup d'autres voyaient que non, et qu'on n'en voulait pas, que ce n'était pas bon pour le CREA. […] ce petit groupe ils n'ont pas vu l'importance qu'il pouvait avoir »[1413].

La position des philosophes implique d'emblée des considérations d'ordre à la fois épistémique et de politique institutionnelle : « nous on ne voulait pas changer de taille, explique Lassègue. On ne voulait pas aller courir à Bruxelles chercher deux millions et demi d'euros »[1414]. Pour Visetti « ça n'avait pas de sens. C'est pas comme ça qu'on

[1408] Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
[1409] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1410] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1411] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1412] *Ibid*.
[1413] Entretien avec Serge Galam, 21.01.16.
[1414] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.

réfléchit à la linguistique, à l'anthropologie »[1415]. Aux jugements de valeur, Lassègue ajoute une analyse d'ordre sociologique :

> « ça vient aussi du changement de la science. Il ne faut pas oublier que la science entre-temps est devenue une science sur projet et donc il a fallu se vendre. C'était déjà le cas aux États Unis, c'est devenu le cas en Europe. [Petitot] connaissait les USA et il a pris ce chemin-là »[1416].

Piotrowski corrobore cette analyse avec une considération, dirait-on, coproductionniste : « les choses s'assemblaient bien, c'est-à-dire que la théorie de la complexité se prêtait justement à une mise en projet et en réseau »[1417].

Le nœud de l'affaire : un monde contre un autre ?

Pourquoi donc Petitot décide de soutenir le projet de Bourgine ? Le disciple de René Thom donne, à propos de son soutien pour Bourgine, trois raisons : le fait qu'il est utile que le directeur d'un laboratoire de l'École Polytechnique soit un ancien élève, le fait qu'il connaissait bien les grandes administrations comme celle de l'École Polytechnique et son soutien aux sciences de la complexité :

> « J'ai commencé à discuter avec Paul de projets polytechniciens. Il avait travaillé avec moi pendant plusieurs années à l'antenne de Palaiseau voulue par Jean-Pierre Dupuy et nous avions donc tous les deux une expérience du plateau. […] Bref, Paul connaissait bien Polytechnique et d'autre part j'étais assez favorable au développement de cette partie du CREA »[1418].

Petitot et Bourgine sont donc proches, et ont en commun leur proximité à l'administration de l'École Polytechnique. Malgré cette asymétrie de prises sur l'institution par rapport aux autres membres du CREA, le divorce entre pôle des SSC et pôle des philosophes n'aura jamais lieu. Toutes les causes listées par nos interviewés plus haut, à savoir les conflits épistémiques, l'affaire de l'enseignement et de la désignation du directeur, le manque d'entente entre l'École Polytechnique et le CNRS, et cetera, jouent toutes un rôle sans doute. Mais les trois ordres de considérations que Petitot nous a livré lors de l'entretien aident à comprendre ce qui pour nous représente le cœur de l'affaire. Nous allons nous y arrêter un instant car elles sont éclairantes, même si Petitot s'était retiré des responsabilités et si ses opinions n'avaient plus aucun pouvoir de décision direct en ce qui concerne la politique scientifique du CREA. Le premier ordre de considérations concerne sa vision des

[1415] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1416] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1417] Piotrowski, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1418] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

sciences cognitives et la place que selon lui doivent y avoir les neurosciences. Le deuxième touche à sa vision de la politique scientifique qu'il aurait été souhaitable de mener pour les SSC, fortement inspirée des États-Unis et du SFI en particulier, et qui s'est heurtée au conservatisme que Petitot attribue à Polytechnique. Le troisième ordre porte sur la vision ouvertement libérale du monde de la recherche, inspirée par Hayek, défendue par le mathématicien, vision différente de celle de Bourgine, qui avait milité dans la lignée de Castoriadis pendant la jeunesse.

Pour ce qui est de la place des neurosciences au sein des sciences cognitives, Petitot considère que les premières devraient être considérées comme le sous-champ maître à l'intérieur des secondes[1419]. Il s'étonne donc que les sciences cognitives aient parfois pu s'installer plus facilement au sein d'institutions dédiées aux SHS qu'au sein des sciences de la vie :

> « quand je dirigeais le DEA de sciences cognitives, régulièrement mes collègues de neurosciences cognitives me disaient, 'C'est insupportable, il y a aucun moyen de faire comprendre aux collègues biologistes de Polytechnique que l'avenir des neurosciences est fondamental, absolument fondamental'. Ce qui fait qu'on en est arrivé au paradoxe que le peu de neurosciences qu'il y a eu à l'École Polytechnique s'est développé dans les départements d'humanités. Les biologistes ont toujours dit non. Quand il s'agit de professeurs comme Jean-Pierre [Dupuy] ou moi, on peut comprendre que ce que nous faisons ne les intéresse pas. Mais quand il s'agit de Frégnac, qui est un des plus grands spécialistes européens en neurosciences, cela ne se comprend plus »[1420].

Selon Petitot, le soutien de Polytechnique aux sciences cognitives découlait de la pression due à leur développement dans le monde entier, plus qu'à une vraie vision scientifique. Et ce soutien a toujours été, selon lui, insuffisant. Voici donc le deuxième ordre de considérations, concernant les visions de la politique scientifique à mener. Bien que ses modèles morphodynamiques alliant phénoménologie et neurogéométrie soient différents des modèles computationnels des SSC, Petitot a toujours soutenu les SSC dont le développement était constitutif du CREA et a considéré que la politique scientifique adoptée par Bourgine après son départ était, bien que différente, complémentaire de la sienne[1421]. Mais surtout, il était convaincu que les SSC étaient bien mieux adaptées au déménagement à l'École Polytechnique de Palaiseau que sa propre morphodynamique thomienne, trop philosophique. Il les a donc défendues.

[1419] Pour en comprendre les raisons, il faut rappeler que, dans ses recherches cognitives, Petitot s'inspire des modèles morphodynamiques de Thom qui mathématisent la phénoménologie à la Husserl et Merleau-Ponty. Et selon lui, les neurosciences confirment ces modèles expérimentalement et en expliquent l'implémentation matérielle : mail de Jean Petitot, 17.10.18.

[1420] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

[1421] Mail de Jean Petitot, 17.10.18.

C'est pourquoi le mathématicien mentionne le SFI et le définit comme un modèle à suivre :

> « J'ai l'impression que le CREA […] a toujours été accepté [par Polytechnique], mais qu'il n'y a jamais eu vraiment de soutien de la Direction et du Conseil Scientifique pour un centre, disons pour aller vite, un peu à la Santa Fe. Il n'y a pas eu d'autorité scientifique de l'École qui dise, 'Ces nouvelles perspectives sont essentielles pour l'avenir, il faut créer un centre, et il faut que des élèves puissent opter pour elles'. […] Frégnac […] prend maintenant sa retraite […] et sans doute qu'avec son départ les neurosciences vont disparaître de Polytechnique, car les candidats qui pensent se présenter pour lui succéder sont plus du côté de la psychologie cognitive que du côté des neurosciences. On a l'impression que Polytechnique n'a pas envie de faire ce pari »[1422].

Petitot voit deux raisons pour expliquer le désintérêt de Polytechnique vis-à-vis de ce domaine. Primo, selon lui l'École Polytechnique fait un calcul de convenance stratégique : « on a parmi les meilleurs laboratoires de neurosciences à Gif-sur-Yvette à un kilomètre et cela n'a donc aucun sens de faire des neurosciences à Polytechnique. Les élèves qui ont envie de faire des neurosciences n'ont qu'à aller à Gif-sur-Yvette au CNRS »[1423]. Selon Petitot le raisonnement ne tiendrait pas, car « à ce moment-là on peut dire exactement la même chose de la physique nucléaire, en disant 'Il y a le CEA de l'autre côté du plateau', donc pourquoi il y aurait-il de la physique nucléaire à Polytechnique ? »[1424]. La deuxième raison que Petitot donne concerne le conservatisme de l'École Polytechnique qui, toujours par rapport au SFI, ne se laisse pas, selon lui, pénétrer par des nouvelles façons de penser, malgré sa recherche de pointe dans les domaines techniques :

> « l'autre argument est que […] dans ces nouvelles disciplines [sciences cognitives et SSC] […] règne une sensibilité scientifique assez différente de la sensibilité scientifique de Polytechnique, qui reste assez traditionnelle. Polytechnique est très en pointe au niveau des grandes technosciences […] mais au niveau des nouvelles sensibilités scientifiques elle est trop classique, pas du tout dans l'esprit Santa Fe »[1425].

Le conservatisme auquel Petitot se réfère est disciplinaire : « [Polytechnique] n'est pas à la pointe de trucs du genre NBIC »[1426]. L'interdisciplinarité évoquée par l'ancien

[1422] Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
[1423] *Ibid.*
[1424] *Ibid.*
[1425] *Ibid.*
[1426] *Ibid.* NBIC : convergence des nanotechnologies, biotechnologies, informatique, sciences cognitives.

directeur du CREA[1427] est définie comme une « nouvelle sensibilité scientifique […] Il ne s'agit pas vraiment d'un nouveau paradigme, mais d'une façon de voir les choses, d'une culture scientifique qui remet en cause l'opposition traditionnelle entre les sciences de la nature et les sciences humaines »[1428]. Comme le SFI, Petitot pense que, tant que les SHS ne se renouvelleront pas avec cette façon de voir les choses, elles ne pourront pas comprendre certains des phénomènes qu'elles étudient :

> « Les sciences humaines de type classique, avec des spécialistes essentiellement de formation littéraire ou philosophique, sont à mon avis complètement dépassées. […] Je pense que […] l'on ne peut comprendre les phénomènes sociaux, les phénomènes psychologiques, et les phénomènes humains en général, qu'en utilisant tout ce dont nous parlons. Donc, si ce dont nous parlons n'est pas représenté, et bien on en reste à des théories classiques, à l'intérieur desquelles on peut faire des choses d'avant-garde, mais qui, à mon avis, ne sont pas scientifiquement originales »[1429].

Le troisième ordre de questions touche à la vision libérale de Petitot – le terme n'est pas abusivement plaqué sur les propos de notre interlocuteur, car il a coédité un livre sur l'histoire du libéralisme européen continental avec le philosophe Philippe Nemo dont il partage l'admiration pour Friedrich von Hayek[1430]. Si d'une part le polytechnicien souhaiterait des centres et des laboratoires stables, car il estime impossible de fonder un domaine avec les seuls projets européens ou nationaux[1431], de l'autre côté il regrette le manque, en France, de processus de destruction créatrice de ces centres, ce qui rendrait les institutions capables d'innover réellement dans le paysage scientifique :

[1427] « On a longuement discuté au CREA de l'identité du laboratoire, quand il fallait faire des rapports, des plaquettes, des affiches, des posters. J'avais introduit le terme clé, que j'aime bien et que je continue à bien aimer, d'interdiscipline 'intrinsèque'. Ce terme signifie que c'est l'objet lui-même qui impose une interdiscipline […] C'est comme pour construire une fusée lunaire. Vous ne pouvez pas ne pas mettre ensemble des spécialistes du carburant, des spécialistes de la métallurgie, des spécialistes de l'informatique, des spécialistes des orbites planétaires, etc. » : *ibid.*

[1428] *Ibid.*

[1429] *Ibid.*

[1430] Nemo, P. & Petitot, J., *Histoire du libéralisme en Europe*, Paris, PUF, 2006. Petitot tient à préciser, suite à la relecture de ce chapitre, que « ce libéralisme purement philosophique et non pragmatique n'a eu aucun impact sur l'évolution du CREA, d'autant plus que Bourgine est anti-libéral » ; il affirme également ne jamais avoir fait de *fundraising*, de construction de projet européens, ni de posséder des connaissances computationnelles : mail de Jean Petitot, 14.09.18.

[1431] Petitot mène une critique de la science sur projet à partir de son point de vue : « Si on créait un laboratoire officiellement de sciences cognitives, il s'agirait alors pour des chercheurs de venir s'installer dans ce laboratoire, ce qui serait une décision fondamentale, un choix de recherche, de vie, de lieu. Leur articles seraient signés 'Laboratoire des sciences cognitives X', et il faudrait donc que ce soit un bon laboratoire. Mais on ne le fait pas. En revanche on lance de grands programmes interdisciplinaires transversaux où il y a des crédits. […] À partir de ce moment, tout le monde a envie d'avoir un peu d'argent et donc tout le monde se dit, 'Ah tu sais, si on fait des sciences cognitives, on a de l'argent'. Et tout le monde dit : 'Mais moi j'ai toujours fait des sciences cognitives' et on présente un projet de sciences cognitives » : entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

« [Les sciences cognitives et les SSC sont] extraordinairement porteu[ses] pour l'avenir. Les résistances à leur développement sont le symptôme d'un problème culturel, qui selon moi est une des raisons principales pour lesquelles des pays comme la France sont en train de baisser au niveau de leur puissance scientifique internationale. En effet […] la vraie innovation se passe aujourd'hui dans des domaines qui ne sont pas suffisamment représentés chez nous. […] Il y a là quelque chose de lié au mode de fonctionnement institutionnel de pays comme la France. […] C'est comme le chômage vous savez : pour embaucher il faut pouvoir débaucher. C'est exactement la même chose avec les centres de recherche : pour pouvoir créer rapidement des centres, il faut pouvoir dissoudre rapidement des centres devenus obsolètes »[1432].

Petitot se dit favorable à la destruction créatrice de centres obsolètes, pourvu que cela mène à en fonder de nouveaux. La vision de Petitot devient plus claire, si l'on examine un échange que nous avons eu avec lui, qui porte sur les projets européens, sur le statut de fonctionnaire et sur la nécessité de détruire pour créer :

« *Petitot* : Les projets ANR sont plutôt modestes entre guillemets. Même s'ils apportent pas mal de crédits, cela concerne essentiellement des choses du genre organisation d'un colloque, équipement technique ou éventuellement offre d'un postdoc. Les [projets européens] sont totalement différents et à une autre échelle. Là, vous disposez de suffisamment de crédits pour monter une équipe, peut-être pas un centre, mais en tout cas une équipe. Cela change tout parce que vous pouvez faire venir des gens travailler à plein temps sur tel ou tel problème. Vous pouvez dire, 'J'ai obtenu une ERC sur tel problème et je peux recruter des postdocs, une secrétaire etc. Est-ce que vous voulez faire partie de l'équipe ?'
Question : Donc vous êtes plus favorable aux financements européens, mais vous avez quand même des réserves ?
Petitot : Oui. Je suis plutôt favorable à ce type de fonctionnement. Sauf qu'il faut passer par l'Europe pour y arriver.
Question : Ce n'est pas précaire ?
Petitot : Mais cela ne me gêne pas.
Question : Dans un laboratoire, les équipes on ne peut pas les démonter tous les cinq ans.
Petitot : Cela ne me gêne pas.
Question : De les démonter tous les cinq ans ?
Petitot : Je suis favorable à la mobilité. Certes je suis assez d'accord avec le statut de fonctionnaire de l'Éducation Nationale, dont d'ailleurs je profite, mais je suis assez opposé à la fonctionnarisation de la recherche en tant que telle car elle

[1432] *Ibid.*

introduit trop de dissymétrie entre chercheurs et enseignants. Les chercheurs devraient enseigner comme je l'ai toujours fait à l'EHESS puis à l'École Polytechnique. Quand je suis rentré au CNRS en mathématiques à la fin des années soixante, on n'était pas fonctionnaire du CNRS, sauf dans les grands laboratoires propres. On entrait au CNRS pour cinq ans, pour dix ans, c'est-à-dire pour des périodes renouvelables. C'est en 1982 que Jean-Pierre Chevènement, alors Ministre de la Recherche, a fonctionnarisé le CNRS et introduit le statut de chercheur à vie. Il en va des centres comme des chercheurs. Personnellement, je trouve qu'il peut très bien y avoir des centres de recherche qui se créent pour une certaine période et puis qui, suivant que les résultats sont bons ou mauvais, sont reconduits pour une nouvelle période ou bien dissous, les chercheurs se redistribuant dans de nouveaux centres.
Question : Le modèle américain.
Petitot : Oui, cela ne me gêne pas du tout.
Question : Sauf que le Santa Fe est privé et pérenne.
Petitot : Oui, je suis également favorable au fait qu'on puisse disposer de crédits privés. Je ne vois vraiment pas pourquoi un laboratoire de recherche ne pourrait pas avoir des fonds venant d'entreprises »[1433].

À cette vision libérale, qui était partiellement pratiquée par Bourgine et qui était de plus en plus celle des institutions impliquées dans l'affaire CREA, s'oppose la vision des philosophes, représentée par Besnier dans l'extrait qui suit et qui est issu de sa lettre aux autres membres du CREA, pour les informer de sa défection de la charge de directeur. Dans cette lettre, Besnier revient sur un certain nombre de points traités précédemment (le rôle du CREA comme supplément d'âme pour les polytechniciens ; la recherche d'une tutelle alternative), mais surtout illustre les mouvements politiques qu'il y avait eu au sein du CREA contre la science sur projet et en faveur d'une « *slow science* » ; Besnier y critique aussi la rhétorique de l'excellence, parlant à titre personnel de son incapacité à être un « *money maker* » et du fait de se voir plutôt comme un « résistant » :

« Mes relations avec le département H2S et le contact avec la direction de l'X m'ont vite désillusionné : notre labo. compte pour à peu près rien dans la stratégie de l'École sur le plateau de Saclay. […] Sur la lancée, j'ai vite découvert les conditions problématiques dans lesquelles se fera notre rapatriement à Palaiseau. L'idée m'a traversé l'esprit qu'on pourrait bien souhaiter notre disparition pure et simple. […] Sachez que j'avais fort avancé sur le front de la recherche d'une troisième tutelle mais que les logiques de clan qui divisent les communautés scientifiques (les PRES

[1433] *Ibid.*

et les Idhex[1434] d'Ile de France en particulier) exigent un sens de la stratégie qui me fait défaut ou auquel je répugne.

Mon expérience antérieure au Ministère de la Recherche m'avait prévenu qu'il ne serait bientôt plus question que d'investissements d'avenir, d'équipements d'excellence et de montages de projets pharaoniques. J'ai touché du doigt que le CREA n'en serait pas exempté et déjà, je reçois les questions du CNRS et de l'X : 'dans combien d'équipex, de labex et d'idhex[1435] êtes-vous donc ?' […] Je sais combien vous êtes en général peu partie prenante de cette agitation et que nous sommes même quelques-uns à avoir signé la pétition en faveur d'une 'slow science' ou à adhérer aux critiques intentées contre le dispositif d'évaluation dit 'Citation Index'. Je devais donc consentir à l'idée que ma direction pourrait être celle d'un 'résistant' seulement suivi par des chercheurs non disposés à se laisser happer par la religion de l'innovation. […] N'ayant plus de carrière à faire, j'aurais pu me résoudre à donner au Labo deux ou trois années de mon temps à venir, mais je suis devenu conscient que cela ne suffirait même plus, que je n'ai rien du 'money maker' indispensable désormais et que je ne parviendrai plus à me convaincre du bien-fondé des stratégies qu'on nous impose comme un destin »[1436].

En étudiant l'histoire du CREA, un observateur voit l'intrication des facteurs. Petitot, même s'il développait des modèles non computationnels, s'il avait constitué l'équipe de philosophie et s'il n'était plus en responsabilité, soutenait néanmoins la politique scientifique de Bourgine pour le transfert à Palaiseau. Mais comment ne pas voir qu'en continuant à pousser le CREA dans une certaine direction sous la contrainte de ce transfert, sans tenir suffisamment compte du pôle philosophique qui ne voulait pas s'y rendre et de la volonté du CNRS de garder ce pôle, la situation était destinée à dégénérer ? Ceux ou celles qui ont pu penser que d'abord Petitot puis ensuite Bourgine s'étaient « pliés » à la seule volonté de l'EP ont été démentis par les témoignages précédents. En effet, les deux « visionnaires » du CREA, pour utiliser un terme utilisé par Visetti, Lassègue et Piotrowski, possédaient, chacun à leur façon, une vision de politique scientifique personnelle précise. Au-delà de leurs différences, elles étaient complémentaires et auraient pu être en partie en accord avec celle de l'EP (même si celle-ci n'était pas très coopérative pour les SSC). Comment comprendre, donc, la fermeture du CREA ?

Conclusion

[1434] La bonne orthographe est Idex.
[1435] *Idem.*
[1436] Besnier, J.-M., « Aux amis du CREA le 27-08-11 », archives de Jean-Michel Besnier.

La prolifération des causes décrites par nos interviewés donne le vertige, comme l'histoire citée en introduction racontée par Timothy Mitchell. Ce désordre est dû à la situation des institutions scientifiques françaises, dont la caractéristique *anomique* au sens durkheimien saute aux yeux, notamment si on les compare à des institutions plus hiérarchiques et soudées comme le SFI. L'*anomie*, pour Durkheim, décrit le manque de « solidarité organique » dans un organisme social[1437] ; elle apparaît lorsque les individus s'isolent les uns des autres et perdent la vision d'ensemble et le sens d'appartenance à une « œuvre commune »[1438]. De quelque manière, le CREA peut être vu comme une institution hétérogène dont, avec le temps, les membres ne se perçoivent plus comme unis, soudés et tournés vers un projet partagé, puisque chacun opère de manière individuelle ou en fonction de son pôle, afin de poursuivre ses propres intérêts ou les intérêts de son pôle. La fidélité aux institutions et à la solidarité organique du groupe dans son ensemble n'est que peu visible dans l'histoire du centre fondé par Dupuy, même si ce phénomène atteint son apogée vers la fin de l'histoire du laboratoire. Maintenant, l'*anomie* constitue le contexte, le fond commun et le terreau dans lequel les actions des individus et des organismes ont eu lieu et qu'ils ont coproduit. Dans le manque de règles régies par une institution solide, les affaires personnelles des individus et des groupes, les tirs croisés des intérêts de chacun, les malentendus et les représailles ont pu jouer un rôle majeur dans le destin du CREA.

Or, sur ce substrat *anomique* se greffe quand même une certaine cohérence, observable dans la relative homogénéité des groupes qui se sont opposés dans les vicissitudes de ce laboratoire. Partons de l'observation selon laquelle, dans tous les récits de nos interviewés, les différents niveaux du discours – théorique, social, institutionnel, idéologique – étaient intriqués, entremêlés. Force est de constater ensuite que ces discours prenaient des formes régulières, que l'*anomie* n'impliquait pas le tous contre tous. Même s'il ne faut pas tomber dans l'erreur de penser que *telle* forme épistémique correspond toujours à *telle* forme idéologique chez tous les protagonistes, une certaine homogénéité entre les membres de chaque pôle s'observe indéniablement. Le paradigme coproductionniste le dit bien : les modes de connaissance du monde vont toujours avec les modes d'organisation du monde. Autrement dit, l'épistémique n'est jamais délié du politique, et vice versa. Au CREA, le pôle philosophique se définissait comme « antiréductionniste », attentif aux « logiques du sens », aussi bien qu'en faveur d'une science de petite taille, « artisanale ». Le pôle des modélisateurs computationnalistes, quant à lui, se voyait comme « moderne » et « interdisciplinaire », attentif au substrat biologique de tout phénomène humain, aussi bien que favorable à des formes technologiques d'innovation, de compétition et de *Big Science*. Les visions de la science, les visions des institutions, les visions de la politique scientifique, les visions éthiques et économiques, se condensent donc dans

[1437] Durkheim, É., *De la division du travail social*, Paris, PUF, 2016, p. 344.
[1438] *Ibid.*, p. 348.

des tous cohérents et les concrétions peuvent être décrites schématiquement par deux idéaux-types : l'un humaniste et pour une « science lente », l'autre computationnel et inséré dans une « science sur projet ».
Les frontières interne-externe, épistémique-politique ou individus-institutions, que nos interlocuteurs ont érigées dans leurs récits, apparaissent comme des dispositifs narratifs qu'ils mobilisent afin de rendre intelligible un évènement confus et douloureux, et/ou afin de poursuivre un objectif stratégique. Ces frontières ne dérivent donc pas seulement d'une limite intrinsèque du point de vue subjectif de chaque protagoniste de l'histoire ; elles jouent aussi un rôle performatif dans l'évolution de la controverse ou dans le récit qui doit en garder la mémoire. En ayant cela en tête, comment expliquer en définitive la disparition du CREA ? Nos interviewés ont repéré comme cause première soit les frictions personnelles, soit les différends épistémiques, soit la controverse relative au poste d'enseignement afférent au CREA, soit les conflits relatifs à l'élection du nouveau directeur, soit le fait de la demande de rapatriement du laboratoire à Palaiseau. Mais personne n'a voulu la fermeture du CREA ; en tout cas, personne ne semble l'avoir cherchée activement. La nôtre semble être une histoire sans héros et sans ennemi, elle paraît presque l'histoire d'un conflit sans guerriers. Tous sont victimes et tous sont bourreaux. C'est une situation paradoxale : il y a un assassinat, mais il n'y a pas de coupable. Pour rendre compte de ce récit chaotique, sans tête ni pieds, il ne nous reste que la conjonction de deux observations. D'une part, les actions des membres du CREA ont eu à la fin comme fond une organisation *anomique*, car de nombreux protagonistes différents, de taille et de nature différentes, qui avaient beaucoup collaboré, se sont mis à s'agiter les uns contre les autres, les uns à côté des autres, souvent en ne reconnaissant pas les intentions et les intérêts les uns des autres, parfois en ne calculant pas les conséquences de leurs propres actions sur la suite des événements. D'autre part, l'existence de deux idéaux-types, condensant chacun à la fois une vision de la production des savoirs et une vision de la politique scientifique à défendre, est à prendre en compte pour avoir mis en scène un dialogue de sourds aux conséquences néfastes pour l'institution que tout le monde disait vouloir sauver.
En conclusion, que nous apprend cette affaire d'un point de vue général, et notamment à propos de la question qui nous occupe dans cet Acte 1 ? Elle illustre que l'idée selon laquelle l'ordinateur est un vecteur irénique du travail interdisciplinaire, aussi bien qu'un accélérateur de ce dernier, est pour le moins simpliste, voire fausse. Les porteurs des sciences computationnelles possèdent une vision de la science, des institutions et des politiques scientifiques, qui ne vont pas sans produire des conflits. Ce que nous avons appelé le pôle modélisateur-computationnel a œuvré, au sein du CREA, à l'aune d'une entreprise compétitive, qui doit gagner des parts de marchés, qui vise à la croissance et à l'innovation pérennes, qui n'hésite pas à évincer les entités qui peuvent constituer une entrave à son avancement. En réaction à cela, le pôle humaniste n'a pas

hésité à opposer des approches sémiotiques menées dans un style de recherche « lent » et « artisanal », il n'a pas douté de mener sa « résistance » quitte à contribuer à la fermeture du laboratoire. Enfin, les pratiques scientifiques numériques ne sont pas les seules à même de condenser un travail scientifique interdisciplinaire, le CREA ayant eu de nombreux exemples de figures qui, individuellement ou par petits groupes, ont dédié leurs carrières à la conjonction entre disciplines et méthodes éloignées.

Chapitre 6 – L'émergence de la communauté franco-européenne des systèmes complexes

Introduction

Dans la narration de ceux et de celles qui assument, sciemment ou pas, une position de déterminisme technique, les objets de l'innovation semblent avoir des pouvoirs thaumaturgiques face auxquels les humains ne peuvent que se plier passivement. Tout y serait automatique : dans le cas de l'ordinateur, son pouvoir irrésistible, tel qu'un moteur non mû de type aristotélicien, serait à même de reconfigurer les pratiques scientifiques et de déterminer la victoire du travail interdisciplinaire en dépit du cloisonnement scientifique traditionnel. Cette synthèse caricature à peine les propos d'un certain nombre d'individus, qui soutiennent que le seul fait d'avoir eu, à partir des années 2000, la démocratisation d'une certaine puissance de calcul, au niveau privé, infrastructurel et scientifique, suffit à expliquer la montée des SSC et de l'interdisciplinarisation des savoirs technoscientifiques. Le présent chapitre raconte l'histoire de la montée en France et en Europe du domaine lancé par le SFI dans les années 1980 et montre qu'un tel type de récits, tenus non seulement par les protagonistes des sciences de la complexité mais aussi par certains de leurs observateurs, est pour le moins incomplet.

Paul Bourgine, l'un des chercheurs les plus actifs dans la fondation des SSC en France et en Europe, nous a raconté que, pour convaincre les organismes financeurs, il a utilisé l'argument selon lequel les outils théoriques – notamment les mathématiques des systèmes dynamiques – et la puissance de calcul permettaient maintenant de fonder une véritable science des systèmes complexes. S'il peut y avoir une divergence entre l'argument pour convaincre des financeurs et l'explication donnée dans un entretien pour rendre compte d'un processus, dans ce cas il n'y en a pas. Le bioinformaticien Guillaume Beslon, membre de l'Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpin (IXXI), refuse la nouveauté radicale des SSC, considère que la seule chose nouvelle des années 2000 est précisément la puissance de calcul et que c'est celle-ci qui a provoqué une renaissance du domaine depuis :

> « Mais Santa Fe, c'est 1984, la première cybernétique c'est les années 1940, Varela et tout cela c'est 1970 […] Huxley c'est 1890. Ce n'est pas du tout un truc nouveau la complexité, ce sont des idées qui datent des Lumières ! […] La seule chose qui est nouvelle dans l'histoire c'est que l'on a un outil pour faire tous les calculs qui sont sous-jacents à ces approches-là, de façon automatique, de façon rapide. C'est la seule chose qui est nouvelle. Donc, quelque part il y a eu une vocation, une possibilité de refonder cela au début ou au milieu des années 2000, parce que la

puissance de calcul était démocratisée et donc il y avait des moyens de faire quelque chose »[1439].

Plus nuancé, le philosophe et historien des sciences Franck Varenne émet une hypothèse similaire :

> « The science of complexity has known multiple births during the 20th century. It has known many historical reconstructions too. But it is only in the 1980's that it began to be a well recognized academic domain. At that time, interdisciplinary research programs became more systematic. There are many reasons for this long maturation. According to me, one of the main factors is quite prosaic. But simultaneously, as we will see, this factor reveals a relative continuity in epistemological positions, contrasting with what is often said about the paradigm shift from simplicity to complexity. This factor is the brutal and large diffusion of PC's in all types of labs all over the world in those years »[1440].

Personne ne peut nier que la démocratisation des ordinateurs portables, le déploiement massif des infrastructures numériques et la présence d'une puissance de calcul inégalée auparavant est, comme le dit Varenne, l'un des facteurs causaux à prendre en compte dans cette histoire. Mais si certains récits, comme le dernier, laissent de l'espace au volontarisme propre aux entrepreneurs scientifiques et à de facteurs ultérieurs, d'autres récits semblent oublier à la fois que l'infrastructure computationnelle est le fait d'une conjoncture économique, politique et culturelle particulière, et que les différents domaines des sciences computationnelles ont été fondés par des humains qui s'y sont investis et qui ont rencontré des obstacles, profité des contingences, mis en place des *asymétries de prises*, performé des métaphysiques et invisibilisé des groupes sociaux concurrents. Autrement dit, la digitalisation des pratiques scientifiques et du monde n'avance pas de manière automatique et inévitable, mais se fait au prix d'un dur labeur où certains groupes sociaux mettent en place des affrontements, en enrôlant d'autres groupes sociaux dans la bataille, pour faire advenir des états de faits, qu'après coup ou *in fieri* le déterminisme technique naturalise et restitue de manière irénique. L'histoire des SSC franco-européennes ajoutent, après celles du SFI et du CREA, des éléments additionnels à l'entreprise de dénaturalisation de tout récit fondé sur une position de déterminisme technique à laquelle s'est attelé cet Acte 1. Nous verrons non seulement qu'il n'y a rien d'inéluctable dans l'affirmation d'un domaine des sciences computationnelles, mais aussi le fait que rien ne garantit que, une fois que les SSC se sont stabilisées, elles ne puissent pas

[1439] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[1440] Varenne, F., « Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity », dans Aziz-Alaoui, M.A. & Bertelle, C. (éd.), *From System Complexity to Emergent Properties. Understanding Complex Systems*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, p. 7.

disparaître. De même, l'interdisciplinarité ne se fait pas naturellement et ne s'entretient pas toute seule, car elle nécessite d'un travail constant pour être mise en place, encouragée et maintenue.

À propos de ce chapitre

Une question descriptive nous guidera dans le récit de cette histoire : quelles sont les stratégies discursives, institutionnelles et politiques que les entrepreneurs scientifiques des SSC français ont mis en place pour faire émerger ce domaine dans l'Hexagone et en Europe ? En France le domaine a pris la forme d'un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) sous le nom de Réseau National des Systèmes Complexes (RNSC). Le RNSC a été le coordinateur de la fondation de plusieurs laboratoires et fédérations régionales inscrites dans le domaine des SSC. Nous nous concentrons surtout sur l'Institut des Systèmes Complexes – Paris Île de France (ISC-PIF), puisqu'il est à la fois le centre le plus important inscrit dans le RNSC et à la fois le plus emblématique pour illustrer les stratégies qui ont été mises en place pour faire émerger le domaine. La dimension internationale est tout aussi indispensable pour comprendre l'émergence des SSC dans le Vieux Monde, notamment au niveau de la Commission Européenne qui a joué un rôle de structuration et d'élargissement d'une communauté émiettée ou inexistante dans plusieurs pays.

Pour raconter cette histoire, nous ne suivrons pas *les voies de la légitimation scientifique* de Schut et Delalandre qu'on a mobilisées dans le chapitre sur le SFI. On s'attèlera plutôt à décrire les différentes stratégies, en suivant les échelles que les entrepreneurs scientifiques franco-européens des SSC ont investies. Ce chapitre se compose, ainsi, d'une section dédiée à la « préhistoire » du RNSC et de l'ISC-PIF et d'une section vouée à étudier les stratégies multi-échelles que les fondateurs ont employées pour fonder ces organismes de recherche. Après ce que nous avons vu dans le chapitre précédent, on pourrait penser que l'ISC-PIF se serait limité à « parasiter » le CREA. En réalité, s'il est vrai que le CREA a été fondamental pour la naissance du RNSC et de l'ISC-PIF, il est vrai aussi que, lors de la fermeture du laboratoire de Polytechnique, l'institut de la complexité francilien a failli disparaître également. La première section montre donc les événements antérieurs à l'opération lancée au début des années 2000 par un certain nombre de chercheurs et de chercheuses qui militaient depuis longtemps pour des sciences de la complexité façon Santa Fe. La deuxième section raconte ensuite l'ensemble des opérations effectuées par ces entrepreneurs scientifiques au niveau de la Commission Européenne, du CNRS, de la Région Île-de-France et de la Ville de Paris pour faire exister les SSC en France et plus généralement dans le continent européen.

Un, personne ou cent mille ?

La sociologie des sciences[1441] et la sociologie de l'innovation[1442] ont fortement remis en cause le rôle des héros omnipuissants, pour montrer qu'un Napoléon est toujours accompagné d'un ensemble innombrable de co-protagonistes plus ou moins visibles, mais tout aussi importants dans le déroulement de l'histoire. Comme le dit le sociologue Gérald Gaglio, « prendre un seul individu comme point focal d'une trajectoire innovatrice expose au risque d'une vision eschatologique »[1443]. Si « [l']inventeur peut être seul […] [l'] innovateur, lui, ne reste jamais longtemps seul »[1444], car ce dernier est un stratège qui enrôle une « multitude d'acteurs »[1445]. Si cela est vrai tant dans le cas américain étudié plus haut que dans celui qui nous occupe ici, il faut toutefois souligner une légère différence entre les deux : le collectif des *Senior Fellows* se donne à voir manifestement comme un ensemble choral (bien que George Cowan ait été un protagoniste fondamental dans l'impulsion du projet du SFI, aussi bien que dans son organisation concrète). En France, le collectif est presque toujours fortement impulsé par une seule personne : le polytechnicien Paul Bourgine. Le fait qu'il s'entoure de plusieurs autres scientifiques, entrepreneurs, politiques, fonctionnaires et industriels ; et le fait qu'à un moment donné, d'autres scientifiques (Gérard Weisbuch, Michel Morvan, Jeffrey Johnson) se chargent du même objectif de manière autonome et indépendante, n'empêchent pas de voir que 1) Bourgine reste le militant le plus actif et le plus durable au fil du temps, car il est le seul qui revient à plusieurs époques, tandis que ses alliés changent, et 2) que les autres entrepreneurs scientifiques des SSC finissent par s'allier avec Bourgine ou par lui laisser les clés de l'entreprise[1446]. Partant, si nous allons nous concentrer souvent sur cette personnalité, cela sera moins par adhésion aux « mythes de l'innovation », si bien déconstruits par Michel Callon, que par une indication nette, fournie par le matériau empirique que nous avons recueilli.

La « préhistoire » des SSC françaises

Bourgine relate avoir suivi, depuis son laboratoire à Aix-en-Provence, la naissance des tous premiers courants de systèmes complexes en Europe et aux États-Unis : « au

[1441] Par exemple, Latour, B., *Pasteur : guerre et paix des microbes.* Suivi de *Irréductions*, Paris, La Découverte, 2011.
[1442] Par exemple, Callon, M., « L'innovation technologique et ses mythes », *Gérer et comprendre*, mars 1994, pp. 5-17.
[1443] Gaglio, G., *Sociologie de l'innovation*, Paris, PUF, 2011, p. 36.
[1444] *Ibid.*
[1445] *Ibid.*, p. 37.
[1446] Bourgine à un moment de l'histoire est le directeur de toutes les nouvelles institutions : du CREA, du GIS RNSC, de l'ISC-PIF et de la ECSS. Petitot explique que c'était pour fluidifier et accélérer les processus de mise en place : « il a dit, 'il y a déjà l'Institut des Systèmes Complexes et cela va peut-être faire beaucoup'. Et puis en définitive il a dit, 'Oui, […] si je prends la direction cela permettra d'avoir plus de fluidité et de mettre tout ensemble » : entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.

GRASCE (labo d'Aix-en-Provence), on suivait la naissance du thème systèmes complexes : conférences sur les systèmes complexes à Montpellier (UNESCO ou ONU) ; en Italie ; Prigogine et on apprenait la naissance de Santa Fe »[1447]. Un groupe de travail du CEMAGREF sur l'ingénierie des systèmes complexes démarre au début de 1993. En 1994, Bourgine réussit à transformer son laboratoire d'intelligence artificielle au CEMAGREF en un Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes (LISC). Premier centre en France à inscrire les systèmes complexes dans son nom, il existe encore aujourd'hui[1448]. Au début implanté à Anthony, dans la banlieue parisienne, le laboratoire est ensuite transféré par le CEMAGREF à Clermont-Ferrand. Ceci génère une réaction chez Bourgine, qui demande son transfert à l'EP, où il reste jusqu'à sa retraite : « Et donc j'ai protesté en disant que je perdais mes relations scientifiques et c'est là où […] le Ministère de l'Agriculture m'a mis à disposition de l'École Polytechnique jusqu'à la fin de ma carrière pendant vingt ans »[1449]. Puisque le LISC était un laboratoire qui rendait service au monde agricole, selon le physicien de l'ENS Gérard Weisbuch la raison de l'abandon de Bourgine est liée à son refus de se soumettre aux objectifs « applicatifs » :

> « L'idée du LISC, c'était des services. C'était surtout des informaticiens qui faisaient des études pour des gens liés à l'agriculture, aux eaux et forêts, machinisme agricole, etc. C'est d'ailleurs pour ça que Bourgine en est parti. Parce qu'il y avait des contraintes vers des sujets beaucoup plus appliqués que ce qui l'intéressait »[1450].

La tentative de l'Institut des Sciences de la Complexité

Convaincu que le LISC ne pourra pas avoir de mordant, du fait de son écartement géographique, le polytechnicien enrôle plusieurs collègues pour lancer une nouvelle initiative. Au début de 1994, Bourgine et le physicien Jean Erceau discutent d'un possible institut de la complexité. En 1995, Bourgine, Dupuy, Erceau, André Orléan, Jean Petitot, John Stewart, André Theureau, Francisco Varela, Bernard Victorri, Yves-Marie Visetti et Bernard Walliser[1451] essayent de lancer un Institut des Sciences de la Complexité[1452]. Visetti résume l'expérience ainsi :

> « dans les années 1990 […] Jean Erceau […] [et] Bourgine […] voulaient faire un truc qu'on aurait vendu très très cher à des entreprises, une initiation aux systèmes

[1447] Mail de Paul Bourgine, 21.03.18.
[1448] Site officiel du LISC : http://motive.cemagref.fr/lisc/presentation.
[1449] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1450] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.
[1451] Comme au SFI, la masculinisation de la recherche française est frappante. Les femmes sont remerciées à la fin du livret pour leur apport organisationnel : Françoise Erceau, Viviane Chouzenoux, Anne Dauvert et Marie-Christine Malengana.
[1452] Bourgine, P. & Erceau, J. (présenté par), « Institut des Sciences de la Complexité. Penser *autrement* la complexité », plaquette inaugurale, archives de Paul Bourgine.

> complexes. Et on avait consacré beaucoup de temps à ça […] une très belle brochure […] mettait en avant tous ces thèmes de la complexité […] [et] cherchait à dire aux industriels que, pour se repérer aussi bien vis-à-vis des objets à produire que vis-à-vis d'un monde dans lequel il faudrait les présenter et leur donner du sens, il fallait apprendre cette espèce de paradigme des systèmes complexes, et donc on se proposait de leur vendre très cher des cours. Ça n'est jamais allé jusqu'au bout »[1453].

Selon Lassègue « Bourgine était très lié au SFI »[1454] et pour Visetti l'institut américain « était la matrice, le phantasme »[1455]. Nous avons pu récupérer la plaquette et, à la lire, il n'y a guère de doutes sur le fait que l'institut dirigé par Cowan avait déjà éveillé des imaginaires en France. Les promesses énumérées dès la première page de la plaquette rappellent celles du SFI :

> « Pour des nouvelles compréhensions
> Pour une dynamique transdisciplinaire
> Pour devenir acteurs du monde
> Vers l'ère de la connaissance
> Vers une ingénierie des systèmes complexes »[1456].

Face à la complexification des systèmes industriels, technologiques, économiques, écologiques, sociaux et politiques, face à la mondialisation et à la fragilisation des équilibres naturels et culturels, selon cette plaquette il faut « une nouvelle compréhension […] fondée sur la transdisciplinarité et la recherche », pour étudier les « systèmes adaptatifs complexes »[1457], à savoir les CAS du SFI. La dynamique transdisciplinaire est « un mouvement international […] qui fait émerger, tout autour de la planète, des lieux de rencontres et d'échanges des nouveaux paradigmes de la complexité »[1458]. Pour Bourgine, Erceau et les autres membres fondateurs de cet ISC qui ne verra pas la lumière, il s'agissait de faire collaborer scientifiques et philosophes, industriels, artistes et politiques. Face aux « effets contre-intuitifs ou contre-productifs » des actions des « acteurs du monde moderne », l'Institut des Sciences de la Complexité se veut comme « un lieu d'échanges et de formation aux nouveaux paradigmes de la complexité », avec l'objectif de ne pas « entrer dans l'avenir à reculons »[1459]. Face à l'entrée dans l'« ère de la connaissance », « une forme moderne

[1453] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1454] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1455] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1456] Bourgine, P. & Erceau, J. (présenté par), « Institut des Sciences de la Complexité. Penser *autrement* la complexité », plaquette inaugurale, archives de Paul Bourgine, p. 3.
[1457] *Ibid.*, p. 5.
[1458] *Ibid.*, p. 7.
[1459] *Ibid.*, p. 9.

de compétence se fait jour : l'ingénierie des systèmes complexes », car « [l]es organisations qui réussissent sont celles qui apprennent au plus vite comment changent leurs environnements externes et s'y adaptent en inventant de nouvelles formes d'organisation interne »[1460]. Quant à l'ingénierie des systèmes complexes, intérêt propre à cette initiative française et étrangère au plus théorique SFI, elle ne peut se faire qu'avec tous les mots d'ordre du SFI et de Varela : « origine », « rupture », « évolution », « adaptation », « viabilité » et « autonomie »[1461].
Interrogé sur cette influence américaine, Bourgine confirme avoir regardé au SFI (Christopher Langton fut invité à la première conférence sur la vie artificielle organisée au début des années 1990 par Bourgine et Varela à Paris), mais il revendique aussi de s'en être détaché : « Santa Fe pendant longtemps, comme il ne s'intéressait pas aux données, a fait un travail plus conceptuel et théorique. […] [avec Varela] on cherchait déjà le plus proche du réel »[1462]. Bourgine explique le choix de se tourner vers les entreprises moins en fonction du SFI que par le manque de contacts dans les organismes publics de financement de la recherche. Il reste que, comme faisait le SFI, le groupe de l'ISC se tourne vers des compagnies privées : « On a fait des brochures et avec Francisco [Varela], nous deux on est allés voir des grands patrons dans l'industrie. Et c'était intéressant de voir comment Francisco fonctionnait avec les grands patrons d'industrie : très bien »[1463]. Puisque Varela travaillait souvent pour L'Oréal, Bourgine put accéder à son PDG de l'époque et il relate qu'ils réussirent à le convaincre à soutenir leur institut[1464]. Face à cette rencontre encourageante, Bourgine et ses alliés décident ainsi de s'adresser aux industriels pour financer l'institut :

> « L'idée pour réellement le lancer cela a été de dire, on invite tous les grands patrons français, on les invite au Futuroscope de Poitiers. On était allé voir [René] Monory qui était d'accord. Monory était à ce moment le président du Sénat. [Il y avait] l'EDF qui supportait l'opération… »[1465].

EDF joue un rôle fondamental, car elle fournit au groupe des fondateurs une liste des « adresses des grands patrons français »[1466]. Une conférence sur l'intelligence collective avait été organisée pour faire connaître le projet de l'institution aux industriels invités. Le projet était d'avoir un siège sur Paris et puis des antennes au sein des compagnies partenaires. Mais un « manque de bol » fit partir en fumée le projet à la dernière minute : « le listing que l'on m'avait donné, se souvient Bourgine, il n'y avait pas les bonnes adresses. Quand je m'en suis aperçu deux mois avant le colloque,

[1460] *Ibid.*, p. 11.
[1461] *Ibid.*, p. 13.
[1462] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1463] *Ibid.*
[1464] *Ibid.*
[1465] *Ibid.*
[1466] *Ibid.*

je suis passé au téléphone et là c'était trop juste »[1467]. L'EDF se refusa de rembourser les dépenses de la conférence ratée et Bourgine dut attendre dix ans pour relancer son initiative : il est en effet le seul du groupe de 1995 que nous retrouvons en 2005.

Trois dispositifs préparent le terrain

Après cet échec, Bourgine et Petitot prennent la direction de l'antenne du CREA à Palaiseau pour y accueillir quelques doctorants. Si cette antenne contribue à former quelques jeunes qui seront plus tard dans le RNSC avec parfois des postes de direction, il est évident qu'elle ne suffisait pas aux yeux du pôle modélisateur du CREA dans l'optique de lancer le domaine des SSC en France. D'après nos matériaux, à part des écoles d'été ou des rencontres-*brainstorming* ayant eu lieu à la même période[1468], trois dispositifs préparent le terrain à l'ISC-PIF et au RNSC au début des années 2000 : l'Action Concertée Incitative soutenue par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche en 2003 pour développer des projets unissant les SSC aux SHS ; les instituts à thème ou « réseaux d'excellence » européens impulsés par Weisbuch, parmi d'autres, au début des années 2000 ; et la European Conference on Complex Systems organisée en 2004 par un grand groupe de militants français, italiens et anglais des SSC. Racontons-les plus en détail.

André Orléan – qui, aux alentours des années 2000, rencontraient régulièrement Bourgine, Walliser et d'autres pour parler d'économie – nous explique que le comité de l'ACI se composait de ces derniers noms et de deux dizaines d'autres (fig. 4). Selon Bourgine, ce fut sur l'initiative du linguiste Alain Peyraube que l'ACI fut mise en place[1469]. Le conseil scientifique de ce dispositif ministériel se réunissait périodiquement afin de distribuer des financements à des équipes françaises travaillant à des outils de quantification des SHS. Les équipes demandeuses de financements au début n'étaient pas légion, comme le dit André Orléan : « On était une trentaine, on se réunissait assez souvent, c'était du boulot. Et on devait faire attention aux conflits d'intérêt, car la communauté était petite et donc les fonds finissaient par revenir pratiquement aux gens du comité »[1470]. Financée par le MESR et le CNRS, l'ACI lançait des appels d'offre et organisait des colloques « pour promouvoir en France le point de vue Systèmes complexes en sciences humaines et sociales »[1471]. Cette initiative dura cinq ans[1472]. Un colloque fut organisé à Cerisy-la-Salle en mai 2007,

---

[1467] *Ibid.*

[1468] Entretien avec Annick Lesne, 03.04.15. Dans un mail, Lesne parle de l'école de Berder : « L'autre entreprise [à part celle du RNSC] dont je suis rétrospectivement assez fière est 'l'école de Berder' (du nom de l'île du golfe du Morbihan où elle se déroulait chaque année) dont la première édition a eu [lieu] en 2002, et ensuite tous les ans, jusqu'en 2014, où elle a déménagé à Porquerolles pour cause de fermeture au public de l'île de Berder, et cette année à Villers-sur-mer (http://ecoleporquerolles.inria.fr.) » : mail d'Annick Lesne, 07.04.15.

[1469] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.

[1470] Entretien avec André Orléan, 04.04.17.

[1471] MESR & CNRS, « Action Concertée Systèmes Complexes en SHS » : http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/systcomplex/appel2004.pdf.

[1472] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.

pour que les équipes soutenues puissent y restituer leur travail. Suivit un livre collectif avec un titre apparemment vulgarisateur : *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ?*[1473].

Le groupe composant le conseil scientifique de l'ACI s'était formé au cours du temps, en tissant des liens surtout lors des conférences scientifiques[1474]. Le physicien Hervé Zwirn, qui était à l'époque conseiller scientifique au MESR, reporte que les représentants des SSC à l'intérieur du comité de pilotage étaient liés par des rapports d'amitié[1475]. L'initiative était fortement soutenue par le CREA, puisque deux membres du comité de pilotage (Richard Topol et Bernard Victorri) ainsi que le président du Conseil scientifique du dispositif (André Orléan) appartenaient précisément à l'UMR en question. Quant à Weisbuch, il dit avoir été choisi comme directeur de l'ACI, en raison de son manque de conflits d'intérêts potentiels[1476]. Dans le document officiel présentant l'ACI, la section « Positionnement national et international du programme » visait à expliciter l'*horizon de rétrospection* de l'initiative. Von Neumann, McCulloch et Pitts, Thom, Haken, Prigogine, les sciences cognitives sont cités, mais aussi et surtout le SFI : « L'Institut de Santa Fe a incontestablement joué un rôle moteur dans le développement des méthodes et de la théorie des systèmes complexes dans cette optique, notamment dans les applications aux systèmes biologiques »[1477].

Parmi les outils principaux mentionnés, les systèmes multi-agents et l'analyse des réseaux reçoivent une attention particulière. Selon les organisateurs de l'ACI, « il est clair que l'utilisation de ces méthodes et de ces techniques par les différentes disciplines des SHS constitue un enjeu majeur pour les années à venir »[1478]. Le programme s'adressait à quatre catégories de chercheurs et de chercheuses : 1) des modélisateurs des systèmes complexes qui travaillent étroitement avec des représentants des SHS ; 2) des économistes, des géographes et des linguistes, « qui ont déjà une certaine habitude de la modélisation »[1479] et qui s'intéressent à enrichir leur discipline avec la théorie des systèmes complexes ; 3) des anthropologues, historiens et sociologues « qui sont restés jusqu'à présent en France en dehors de ce mouvement, qu'il s'agit de sensibiliser à ces outils »[1480] ; 4) enfin « [d]es chercheurs centrés sur des applications en liaison avec les entreprises et l'administration disposant de ce fait de données réelles qui sont peut-être ce qui manque le plus pour permettre la construction de modèles réalistes »[1481]. Le livre qui sort du colloque de Cerisy pour réunir une

[1473] Weisbuch, G. & Zwirn, H. (ed.), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*, Paris, Vuibert, 2010.
[1474] Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
[1475] Entretien avec Hervé Zwirn, 11.01.16.
[1476] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.
[1477] MESR & CNRS, « Action Concertée Systèmes Complexes en SHS » : http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/systcomplex/appel2004.pdf.
[1478] *Ibid.*
[1479] *Ibid.*
[1480] *Ibid.*
[1481] *Ibid.*

partie des travaux financés par l'ACI en contient une dizaine qui portent sur les langages, sur les réseaux, sur les marchés et sur les systèmes spatiaux. La plupart des recherches en question utilisent comme méthodes d'enquête computationnelles les systèmes multi-agents et la théorie des réseaux[1482].

Une autre série d'initiatives prépara le terrain au lancement des SSC au niveau français et européen : les instituts à thème, officiellement appelés « réseaux d'excellence » par la Commission Européenne. Weisbuch en était l'un des organisateurs les plus engagés[1483]. Ancien membre du SFI, ce physicien nous a raconté que, au tournant des années 2000, plusieurs personnes qui avaient connu l'institut américain se retrouvaient à habiter en Europe. Elles voulaient organiser des recherches en SSC dans le continent, même si « ça [leur] semblait assez difficile »[1484]. Weisbuch était basé à Paris, l'économiste David Lane vivait entre Venise et Modène, le physicien Norman Packard participait à un projet qui avait son siège à Venise, tandis que l'éconophysicien Doyne Farmer à l'époque habitait à Rome. D'après Weisbuch, le *deus ex machina* qui vint les aider dans une telle entreprise est un personnage dont nous parlerons également dans la section suivante : Ralph Dum. Physicien viennois, Dum et Weisbuch se connurent à l'ENS de Paris car le premier y conduisit un postdoctorat, avant de se faire embaucher par la Commission Européenne en tant que *Program Officer*. D'après Weisbuch, ce qui fut déterminant pour déclencher les premiers financements européens pour les SSC n'est autre qu'une imprimante :

> « [Ralph] était en postdoc ici et on partageait la même imprimante. […] de temps en temps il regardait ce que je faisais. […] il a quitté le labo […] et il est devenu Program Officer à Bruxelles. […] [Les SSC] [ç]a l'intéressait, il a dit qu'il faut faire quelque chose, on va faire l'appel d'offre européen »[1485].

Cette contingence se transforme dans un élément fondamental pour le dénouement successif. Selon Weisbuch, « en Europe il y avait des bonnes et des mauvaises expériences sur les institutions paneuropéennes »[1486]. Puisque, exception faite pour des rares exemples comme le CERN, ces institutions permanentes « ne marchent pas du tout »[1487], selon Weisbuch « Ralph [Dum] ne voulait pas tellement d'une institution indépendante, de toute façon on ne sait pas où on l'aurait mise, donc on a décidé de

[1482] Weisbuch, G. & Zwirn, H. (ed.), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ?*, *op. cit.*

[1483] Physicien expérimental, expert de polymères, Weisbuch fait un postdoctorat à l'Institut Weizmann d'Israël où il découvre le concept d'auto-organisation sous la supervision d'Aaron Katchalsky et connaît Henri Atlan. Weisbuch est d'abord professeur à Marseille, pour ensuite arriver à Paris. Influencé par Thom et Waddington, il collaborera avec Stuart Kauffman du SFI, où il se rendra au début des années 1990 par le biais de Gérard Toulouse. Weisbuch retrouva au SFI des personnes qu'il connaissait déjà par ses travaux (Alan Perelson, Philip Anderson, Kauffman).

[1484] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.

[1485] *Ibid.*

[1486] *Ibid.*

[1487] *Ibid.*

faire des instituts à thèmes »[1488]. D'après Weisbuch, c'est Dum de sa propre initiative qui « a poussé les systèmes complexes » au niveau européen[1489]. Les instituts à thème étaient itinérants et réunissaient des chercheurs et des chercheuses pendant un ou deux mois. Si l'Institute for Advanced Studies de Princeton est cité par Weisbuch comme le premier exemple d'entité organisant des instituts à thème, le choix de cette forme de collaboration s'inspire du SFI, car mettre ensemble une vingtaine de scientifiques de disciplines différentes pour une courte période « c'est ce qui marchait à Santa Fe »[1490].

Conseil scientifique de l'action concertée Systèmes complexes en SHS

Membre	Discipline	Laboratoires
BERDOULAY Vincent	Géographie	Société Environnement Territoire, IRSAM, Université de Pau
BOURGINE Paul	Systèmes complexes	CREA Ecole Polytechnique, Paris
CONEIN Bernard	Economiste	IDIST Université Lille III
GROSSETTI Michel	Sociologue	Université de Toulouse-le-Mirail
KIRMAN Alan	Economiste	GREQAM, Marseille
KOENIG Ekkehard	Linguiste	Freie Universitat Berlin
ORLEAN André	Economiste	Président du Conseil Scientifique, CEPREMAP
PARISI Dominico	Sciences Sociales	Research Group on Artificial Life, Roma.
PEPERKAMP Sharon	Sciences Cognitives	Lab.Sciences Cognitives et Psycholinguistique, EHESS - CNRS
PETITOT Jean	Sciences Cognitives	CREA Ecole Polytechnique, Paris
PIERREL Jean-Marie	Philosophie	LORIA - Paris
PEYRAUBE Alain *	Linguiste	département SHS du CNRS
PUMAIN Denise	Géographie--Cités	Université de Paris I
RECANATI François	Philosophie	Institut Jean Nicod Paris
STEELS Luc	Linguiste	AI-lab (ARTI), Vrije Universiteit Brussel
TOPOL Richard *	Economiste	CREA Ecole Polytechnique, Paris
VIGNES Annick	Economiste	ERMES Paris 2-UMR7017 & Université de Reims
VICTORRI Bernard *	Mathematicien, Linguiste	département SHS du CNRS
WALLISER Bernard	Economiste	CERAS-ENPC Paris
WEISBUCH Gérard *	Physique statistique	LPS de l'École Normale Supérieure, Paris
ZWIRN Hervé *	Physique, épistémologie	IHPST & Eurobios

** membres du comité de pilotage*

Figure 4. Conseil scientifique de l'Action Concertée Incitative Systèmes complexes en SHS, liste issue du site officiel de l'ACI : http://www.lps.ens.fr/~weisbuch/scshs/conseilScientifique.html.

Des instituts à thème, sous le label européen de Network of Excellence, furent organisés à Turin, à Budapest, à Lyon et dans d'autres villes européennes, entre les années 2001 et 2006, sur des thématiques qui allaient des sciences cognitives à l'étude des organisations sociales. Les instituts à thème, que Weisbuch souhaitait continuer, se son arrêtés lorsque Bourgine et le mathématicien britannique Jeffrey Johnson (basé à l'Open University de Milton Keynes, au Royaume Uni), ont pris la relève pour lancer

[1488] *Ibid.*
[1489] *Ibid.*
[1490] *Ibid.*

les institutions dont nous parlerons dans la section suivante. Cela eut comme effet de produire des crispations entre le normalien et le polytechnicien :

> « [Bourgine] a dit, 'Je prends la relève, c'est moi qui vais diriger le suivant'. Puis en pratique il y avait un conflit formidable parce que moi je voulais continuer avec les instituts à thème, et lui ce qu'il voulait c'était des coordinateurs, il a dit ce qui est important c'est d'avoir une grande puissance de calcul, mettre le maximum d'argent dans la puissance de calcul, et puis on va supprimer les instituts à thèmes. Il y a eu un conflit, je me suis retiré, et c'est lui qui a continué »[1491].

Selon plusieurs de nos interlocuteurs, l'ACI et les instituts à thème jouèrent un rôle important dans la création des liens qui ont servi pour le lancement des SSC en France et en Europe. Une série de conférences ont eu une certaine pertinence également.
Le colloque de Cerisy de 2004 intitulé *Déterminismes et complexités : du physique à l'éthique. Autour d'Henri Atlan*, qui a donné suite à une publication avec le même titre[1492], réunit surtout des personnes de la première et de la dernière période du CREA – d'une part Atlan, Pierre Livet, Dupuy et d'autre part Bourgine, Chavalarias, Longo et Michel Bitbol – ainsi que Weisbuch et Annick Lesne, physicienne qui sera plus tard membre du RNSC. Celui-ci est cependant un colloque très philosophique et peu opérationnel institutionnellement.
La conférence européenne sur les systèmes complexes de 2004 est le dernier acte de cette préhistoire et inaugure les stratégies dont il est question dans la suite de ce chapitre. Elle fut notamment le lieu de fondation de la European Complex Systems Society[1493], qui a ensuite chapoté plusieurs projets de recherche européens inscrits dans les SSC. Même si depuis 2015 elle est organisée sous l'aile de la Complex Systems Society qui est internationale, la conférence de 2004 est considérée par beaucoup comme l'acte fondateur de la communauté européenne. Elle fut conçue par Dum, qui eut également l'idée de faire rencontrer et collaborer Bourgine avec Johnson[1494]. Organisée en Italie avec le soutien de l'Institute for Scientific Interchange (ISI) de Turin et avec la contribution financière du réseau d'excellence EXYSTENCE (soutenu par le programme Future and Emerging Technologies ou FET[1495] de la

[1491] *Ibid.*
[1492] Bourgine, P., Chavalarias, D. & Cohen-Boulakia, C. (ed.), *Déterminismes et complexités : du physique à l'éthique. Autour d'Henri Atlan*, Paris, La Découverte, 2008.
[1493] « Paul Bourgine, Mina Teicher and I (and others) already had an idea for an annual conference on complex systems, and the foundational meetings for this took place at ECCS'04. The European Complex Systems Society (now the CSS) was launched at that meeting […] we retrospectively called the Torino conference ECCS'04 as the first in the series of what is now the Conference on Complex Systems » : mail de Jeffrey Johnson, 23.03.18.
[1494] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17 ; entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1495] Voici l'auto-présentation de FET sur sa page institutionnelle : « The visionary aspects and exploratory characteristics of FET might make it sound like a kind of magic, but the mission of FET is actually very concrete: to turn Europe's excellent science base into a competitive advantage. FET actions are expected to initiate radically new lines of technology through unexplored collaborations between advanced

Commission Européenne[1496]), elle se tint à Turin du 5 au 8 décembre 2004. De 2005 à 2007, elle sera financée encore par FET mais aussi par le programme New and Emerging Techonology (NEST)[1497], qui contribuera dans l'édition de 2008[1498]. De 2009 à 2011, les contributions financières provinrent d'un autre projet européen (Action for the Science of complex SYtems for Socially intelligent icT ou ASSYST), tout comme les éditions de 2012 à 2017 qui ont reçu des soutiens mineurs de projets européens individuels (et non pas des vastes programmes). Cependant, Johnson tient à souligner que, à l'exception des premières éditions, la conférence se soutient en grande partie d'elle-même via les inscriptions de ses 800 participants[1499].
L'ECCS'04 a réuni les participants aux projets de recherche financés par FET. Dans le texte qui présente la conférence, on peut lire une sorte de généalogie des SSC. Elles sont vues comme la confluence entre les recherches en physique sur les transitions de phase, l'intelligence artificielle, l'informatique, la vie artificielle, la biologie de systèmes et les SHS computationnelles basées sur l'emploi des MBA. Comme on peut le lire toujours sur le site, cette conférence fut explicitement conçue comme une fondation de la European Complex Systems Society et, par là même, du domaine des SSC en Europe. L'influence du SFI est visible dans la mention qui est faite de quatre projets intégratifs à cheval entre plusieurs projets spécifiques, afin de réfléchir à des fondations communes aux études des systèmes complexes :

> « The conference also aimed to provide a forum for exchange among the members of four new European Integrated Projects – PACE, ECAGENTS, DELIS and EVERGROW. These four projects – each a concerted effort within some specific area of complex systems research – stand to gain from ideas, insights and methods developed in other projects, and from sharing the broad interdisciplinary perspective of complex systems research. […] The timeliness of this conference, and the broad scientific consensus on the need for general insight into the nature of complex systems was illustrated at the end of the conference, at the founding of the European Complex Systems Society ».

---

multidisciplinary science and cutting-edge engineering. It will help Europe grasp leadership early on in those promising future technology areas able to renew the basis for future European competitiveness and growth, and that can make a difference for society in the decades to come. Under Horizon 2020, FET actions have been allocated a provisional budget of 2 696 million euro » : http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/future-and-emerging-technologies.

[1496] Page dédiée à la conférence de 2004 sur le site officiel de la Complex Systems Society : https://cssociety.org/events/15.

[1497] La page de la conférence de 2006 à Oxford, financée par NEST : https://cssociety.org/events/13.

[1498] Mail de Jeffrey Johnson, 23.03.18.

[1499] « This is important because these conferences were not 'gravy train' events – the organisers took large financial risks backed by their institutions or even personal funds. Today, as far as I know, there are no subsidies for the CCS – it is self-sustaining with a community of about 800+ attending each year. This is a success for the Commission – it seed-funded the CSS and CCS creating important scientific infrastructure » : mail de Jeffrey Johnson, 23.03.18.

Cela ne va pas sans rappeler les workshops intégratifs organisés dans les premières années du SFI afin de trouver des principes communs aux CAS. Ciro Cattuto, un physicien italien, expert de l'apprentissage machine et des *Big Data*, qui a travaillé dans l'industrie informatique et qui a des charges administratives à l'ISI de Turin, donne une analyse sociologique de la fonction de ces conférences. Selon lui, elles ont contribué à créer une communauté internationale, à la fois en fédérant des personnes qui ne se connaissaient pas et en impulsant de nouvelles vocations grâce aux *success stories* des organisateurs :

> « [La conférence] a été un instrument très puissant qui est devenu un lieu de visibilité, un lieu de discussion réelle, un lieu de lobbying […] beaucoup des projets de *complexity* sont nés dans ces discussions-là à cette époque-là. Donc tu sais, ces conférences sont puissantes, elles créent une vie de groupe visible, une notion publique d'identité de groupe au niveau sociologique. […] beaucoup de personnes se disent, 'Ben, je ne sais pas exactement quel animal je suis', soudainement elles se disent, 'Allez, je suis un *complex system* [*scientist*]' […] ces narrations sont puissantes parce qu'elles te donnent des histoires de vie. À partir du moment où tu as ces narrations ça a été plus facile impliquer des jeunes brillants »[1500].

La conférence de 2005, année de fondation du GIS RNSC en France, contient des discours épistémiques qui ressemblent beaucoup aux discours du même genre que le SFI tenait dans les années 1980 et 1990. Il y est notamment question de fonder une science des systèmes complexes :

> « Complex systems, as networks of interactive entities, are studied through a rapidly increasing mass of data in all domains. At the same time, these domains share a lot of new and fundamental theoretical questions. This situation is especially favourable for developing the new science of complex systems in an interdisciplinary way. The ECCS'05 is a step towards this new science »[1501].

Selon les organisateurs de la conférence, la méthode pour fonder une science des systèmes complexes ne peut être qu'interdisciplinaire. Les entrepreneurs scientifiques des SSC se font théoriciens, épistémologues et en même temps hommes politiques. Ils décrivent ainsi une anatomie du travail interdisciplinaire tout en créant une ingénierie disciplinaire pour développer le champ dans le continent ; cela à travers l'attaque d'un problème qui relève de plusieurs disciplines avec des méthodes communes :

[1500] Entretien avec Ciro Cattuto, 17.02.17.
[1501] La page de présentation sur le site officiel de l'ECCS 2005 : http://complexite.free.fr/ECCS/.

« There are two kinds of interdisciplinarity within complex systems. The first kind begins with a particular complex system and addresses a variety of questions coming from its particular domain and points of view. The second kind addresses issues that are fundamental to complex systems in general. The first kind leads to domain-specific interdisciplinary fields such as cognitive science. The new science of complex system belongs to the second kind of interdisciplinarity. It starts from fundamental open questions relevant to many domains, and searches for methods to deal with them »[1502].

Ces ingénieurs socio-épistémiques continuent d'expliquer que le champ pourra se développer si les deux interdisciplinarités, « horizontale » et « verticale », marchent ensemble ; comme au SFI, l'approche théorique, typiquement mathématique et computationnelle, doit se coupler de l'empirie quantitative :

« These two kinds of interdisciplinarity are complementary and interdependent : any advance in one is valuable for the other. The science of complex systems will develop through a constantly renewed process of reconstructing data from models with a permanent interaction between the two kinds of interdisciplinarity »[1503].

Les statuts de l'association montrent que la volonté fondatrice n'est pas seulement verbale : elle s'efforce de devenir opérationnelle à travers le code normatif de l'association elle-même[1504]. L'ambition étant grande – fonder une nouvelle science –, les objectifs pratiques et stratégiques que l'on lit dans la mission de la CCS ne sont pas moins ambitieux. L'association se charge en effet de promouvoir la formation d'une identité SSC internationale à travers plusieurs moyens (pédagogie, collaborations entre pays, etc.) :

« The Society will aim to promote complex systems research (pure and applied), assist and advise on problems of complex systems education, concern itself with the broader relations of complex systems to society, foster the interaction between complex systems scientists of different countries, establish a sense of identity amongst complexity scientists, and represent the complexity community at international level »[1505].

Si les objectifs pratiques sont ambitieux, les moyens pour les réaliser sont nombreux et hétérogènes :

[1502] *Ibid.*
[1503] *Ibid.*
[1504] Les statuts de la CSS : https://cssociety.org/about-us/statutes.
[1505] *Ibid.*

« To achieve its aims the Society may prepare proposals and motions, make statements, organize courses and seminars, arrange negotiations and meetings, operate as a publisher, award grants and represent its membership, and more generally take all pertinent initiatives of a legal nature to promote the science of complex systems and its applications »[1506].

Parmi les participants à l'ECCS'04, l'on retrouve une bonne partie des personnes que nous avons rencontrées lors de notre travail de terrain sur les SSC en général, mais aussi lors de notre terrain spécifique sur les domaines de l'épidémiologie quantitative et de la géographie quantitative (voir chapitre 15). En 2004, à Turin l'on retrouve bien sûr Bourgine et Johnson, instigateurs de cette initiative, mais aussi Michel Morvan, qui a fondé l'IXXI de Lyon ; puis Vittoria Colizza et Alessandro Vespignani, que nous avons rencontrés à Paris et Boston pour parler de leurs méthodologies computationnelles dédiées à la prédiction des pics épidémiques ; il y avaient également Daniela Paolotti et Ciro Cattuto de l'ISI, qui nous ont fait part de certaines informations importantes quant au processus de fondation des SSC à travers la Commission Européenne. Tout cela nous occupe dans la section suivante. Un dernier mot sur les circulations entre le SFI et la France.

Entre la fin des années 1980 et le début des années 1990, les physiciens français Bernard Derrida (Collège de France), Gérard Toulouse (ENS) et Gérard Weisbuch (ENS) ont été des visiteurs au SFI[1507]. De tous les trois, Weisbuch a été le plus actif pour faire revivre l'esprit et le projet du SFI en Europe. Il a co-organisé les instituts à thème, contribué à créer des financements pour les SSC au niveau de la Commission Européenne et participé aux premiers pas de la fondation du domaine en France, en collaboration avec le groupe de Bourgine. Il n'a pas, par la suite, rejoint l'ISC-PIF, en partie à cause de sa retraite et en partie pour ses dissidences avec Bourgine. Derrida restera en dehors de ce domaine, dont il critique une partie des travaux[1508]. Toulouse disparaît des radars du SFI dès la moitié des années 1990 et n'entre pas dans la mouvance française des SSC, pour des raisons que nous ignorons. Quant à Bourgine, bien qu'il n'ait jamais été associé au SFI, c'est sans doute en direction du Nouveau Mexique qu'il a trouvé une grosse partie de son inspiration pour lancer les SSC sur le sol européen. Et c'est surtout avec Morvan – qui avait été *External Professor* au SFI au début des années 2000 – qu'il fonde le RNSC.

Une stratégie multi-échelle pour fonder une science multi-échelle

[1506] *Ibid*.
[1507] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1, p. 25.
[1508] Entretien avec Bernard Derrida, 08.03.16.

Paul Bourgine est convaincu du fait que, pour fonder le domaine des systèmes complexes, il faut recourir à une stratégie complexe. Tout comme, pour comprendre un système complexe, il faut selon lui trouver la bonne échelle[1509], de même, pour fonder un nouveau domaine, il faut agir à toutes les échelles pertinentes : « On a décidé de lancer la science des systèmes complexes à toutes les échelles en même temps, c'est-à-dire au niveau de la Région Ile-de-France, national et international »[1510]. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si dans l'appel à projets de l'ISC-PIF, l'une des « Grandes Questions » de recherche soit intitulée « Du contrôle optimal à la gouvernance multi-échelles »[1511]. D'après Bourgine, si l'on veut qu'une certaine institution soit enrôlée, les chances pour que cela réussisse augmentent si on la presse à la fois « par le bas et par le haut »[1512]. Ainsi, dans cette optique, l'UNESCO devait presser du niveau haut vers le bas de la Commission Européenne, qui à son tour devait presser sur le CNRS, qui était pressé par le bas par les Régions, lesquelles à leur tour étaient pressées par les Mairies, par les universités et par les laboratoires de recherche :

> « tu obtiens beaucoup plus d'adhésion au niveau intermédiaire quand tu pousses par le bas et par le haut. […] Donc on a gagné les grands organisateurs de recherche français, en disant que l'Europe était intéressée. On a gagné l'Europe et on a cherché au niveau international [du côté de] l'ONU […] quand tu veux convaincre la Région, tu fais pousser par le bas tous les gens de l'ISC-PIF […] et puis par le haut, tu essaies de convaincre l'ensemble des Régions françaises »[1513].

Nous avons déjà vu que l'ACI a impliqué le CNRS et le MESR ; nous avons vu également que l'ECCS se constitue grâce à la Commission Européenne. Les deux dispositifs qui ont permis aux SSC d'être ancrées en France sont toutefois le GIS du CNRS et le Domaine d'Intérêt Majeur de la Région Ile-de-France[1514]. Il faut partir de ces deux dispositifs : nous illustrerons ensuite aussi le rôle de la Commission Européenne, de la Ville de Paris et des initiatives menées au niveau de l'UNESCO.

[1509] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1510] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1511] Région Ile-de-France, « Domaine d'Intérêt Majeur (DIM). 'Problématiques transversales aux systèmes complexes'. Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France (ISC-PIF) », appel à projet 2014.
[1512] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1513] *Ibid.*
[1514] Selon Guillaume Beslon, de l'IXXI, les financements régionaux à la recherche arrivent avec la vague d'élections de la gauche dans plusieurs régions françaises au début des années 2000 et l'on prend comme modèle la Région Rhône-Alpes : « 2006 c'est le passage de 83% des Régions françaises de la droite à la gauche. OK ? […] On est sur la fin du mouvement Sauvons La Recherche. Toutes les régions basculent à gauche. […] [Et elles] se mettent à suivre une politique qui a été déjà présente en Rhône-Alpes, qui est d'avoir une politique de financement régional de la recherche. Mais cela existait déjà en Rhône-Alpes » : entretien avec Guillaume Beslon, 15.09.15.

Bourgine explique que, en même temps que la société européenne était lancée, le comité du GIS se constituait avec une mission opérationnelle pour encourager l'interdisciplinarité :

> « Au niveau international on a créé la Complex Systems Society, au niveau national le Réseau National des Systèmes Complexes qui est un Groupe d'intérêt scientifique. On a impliqué la Conférence des Présidents des Universités avec tout cela car on a pensé que, les sciences complexes étant interdisciplinaires, il faut apprendre plus vite les connaissances de l'autre »[1515].

Le GIS du RNSC est fondé en 2005 : il se met en place à peu près en même temps que les GIS de l'ISC-PIF de Paris et de l'Institut des Systèmes Complexes Rhône-Alpin (IXXI[1516]) de Lyon, dirigé au début par Michel Morvan. Les GIS sont des entités créées par le CNRS, qui en contrôle et gère toutes les finances, pour réunir pendant quatre ans un certain nombre de partenaires, afin de collaborer autour d'un domaine de recherche jugé important. Si l'on regarde les statuts du GIS du RNSC, on apprend un certain nombre de choses. D'abord, on y découvre que les trois premiers partenaires étaient le CNRS, l'INSERM et l'INRA. Dans les années suivantes, ils seront une quinzaine. On découvre ensuite la vision officielle qu'a ce réseau de la « science des systèmes complexes », qui est aussi la vision de Bourgine et de quelques autres porte-parole de ce domaine, mais non pas de la majorité des chercheurs et chercheuses qui, tout en bénéficiant de ses espaces, ne croient pas à l'existence ou à la possibilité de fonder une telle science. Selon le statut du RNSC,

> « la science des systèmes complexes est complémentaire des disciplines qui étudient les systèmes complexes ; elle se développe à partir des questions théoriques qui traversent ces disciplines ; elle correspond à un mouvement profond de ces disciplines qui produit un nombre rapidement croissant de données sophistiquées sur ces systèmes ; la science des systèmes complexes contribue aussi de façon durable à concilier la science avec les besoins sociétaux, parce qu'elle concerne les systèmes complexes qui nous habitent et dans lesquels nous habitons »[1517].

[1515] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.

[1516] L'origine de cet acronyme nous est donnée par Sébastian Grauwin, un ancien postdoctorant de l'IXXI : « Au tout départ l'institut utilisait l'acronyme ISC pour 'Institut des Systèmes Complexes'. Mais l'acronyme était déjà utilisé par l'ISC-PIF, donc les fondateurs ont vite voulu changer de nom… Certains documents originaux présentaient l'acronyme en français puis en anglais, comme ça arrive couramment, ce qui donnait 'ISC – CSI' pour 'Institut des Systèmes Complexes – Complex Systems Institute'. Quelqu'un s'est dit, 'Tiens, ISCCSI', c'est pas mal. Une contraction phonétique plus tard, on en arrivait à IXXI » : mail de Sébastian Grauwin, 08.05.13.

[1517] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 1.

Les auteurs de la Convention parlent explicitement de « systèmes adaptatifs complexes »[1518]. Le SFI constitue le modèle de la rhétorique prometteuse du RNSC, laquelle est très hétérogène dans ses déclinaisons. Au niveau épistémique : la science de la complexité dépasse et unifie les disciplines (voir encore une fois les workshops intégratifs sur les CAS au début de l'histoire du SFI). Au niveau technique : elle bénéficie de l'arrivée des *Big Data* (on peut se souvenir de la Matrice Biologique dès la fin des années 1980 mise en place par le SFI). Au niveau politique : là où le SFI parlait de « problèmes du monde réel », le RNSC parle de « besoins sociétaux »[1519].
Comme dans tout domaine émergent, une série de dispositifs institutionnels et organisationnels doivent être mis en place pour ancrer des personnes, des discours, des pratiques, des techniques et des résultats à des espaces reconnaissables et reconnus. Les statuts du RNSC expliquent qu'« un groupement […] [a] le but de favoriser l'émergence d'Instituts régionaux bien reliés à la communauté européenne et internationale »[1520]. Comme le SFI, le GIS se pose donc en *tisseur de liens*, mais, à la différence du premier, il regarde à beaucoup plus d'échelles que son modèle américain. Si le SFI s'adresse surtout aux entreprises et à l'État fédéral, le RNSC s'adresse à six échelles différentes : laboratoires, villes, régions, État, Europe et organismes internationaux. Reconstruire l'histoire des SSC ne peut donc pas se passer d'un regard multi-échelle. Juste en prenant en compte le RNSC, on est confrontés d'emblée aux niveaux régional, européen et international. Sa mission principale est celle de « préparer les conditions pour rassembler tous les acteurs institutionnels, économiques qui souhaitent contribuer au développement de la science des systèmes complexes »[1521]. Concrètement cela doit se réaliser par la fédération, la coordination et l'évaluation de « toutes les initiatives relatives à la science des systèmes complexes »[1522], par « la création de nouveaux instituts »[1523] et par la création de « laboratoires et […] équipes pérennes »[1524]. En même temps, pour être pleinement un « réseau », le RNSC doit être fluide. L'ennemi principal d'un *tisseur de liens* ce sont les barrières. Les abattre devient ainsi l'objectif pratique et matériel principal de ce dispositif :

> « [Le RNSC] vise à intégrer le réseau des chercheurs français, en levant les barrières *institutionnelles* par son statut même, les barrières *disciplinaires* par une stratégie de cours libres de haut niveau et les barrières *géographiques* par de nouveaux moyens de travail collaboratif autour d'un portail interactif »[1525].

[1518] *Ibid.*, p. 15.
[1519] *Ibid.*, p. 1.
[1520] *Ibid.*, p. 2.
[1521] *Ibid.*
[1522] *Ibid.*, p. 11.
[1523] *Ibid.*
[1524] *Ibid.*
[1525] *Ibid.*

Les cours libres dont font mention les statuts sont expliqués une page plus loin, lorsqu'on lit le dispositif des « Introductions avancées »[1526]. Ces Introductions consistent dans la présentation des points fondamentaux d'une discipline (questions, méthodes, débats en cours) au bénéfice de ceux et celles qui n'appartiennent pas à la discipline en question, pour leur permettre d'être opérationnels rapidement dans les rapports interdisciplinaires. Le RNSC ne cherche pas seulement à connecter les scientifiques entre, mais aussi à mettre en communication les scientifiques avec « les acteurs de la société, intéressés par la modélisation des systèmes complexes et leur gouvernance »[1527]. Certains sociologues parleraient ici de transdisciplinarité, pour indiquer la collaboration entre figures différentes : académiques, décideurs, industriels, associations, etc. Quant aux barrières institutionnelles et géographiques, le portail interactif se pose comme « le lieu privilégié où tout membre de la communauté peut obtenir non seulement l'accès à tous les *contenus libres* […] mais aussi à *tous les outils pour créer ces contenus libres* »[1528]. Nous y reviendrons.
Dans le statut du RNSC, on indique les instituts ISC-PIF et IXXI comme les lieux sur lesquels vont s'appuyer les partenaires du GIS. Ces derniers peuvent rentrer dans le GIS suite à l'approbation du conseil d'administration et en sortir à tout moment. Les chercheurs et les chercheuses associés au GIS sont ceux et celles qui participent à un projet de recherche ou à une action d'animation développée par le RNSC. Les scientifiques restent affectés aux laboratoires et aux institutions dont ils relèvent[1529]. Pendant les deux premières années, l'ancrage physique du RSNC fut le CREA et cela représente une exception, car les GIS n'ont presque jamais de locaux propres. Les statuts du RNSC expliquent que c'est en raison de ses modèles inspirateurs :

> « Le fonctionnement des Instituts s'inspire d'expériences exemplaires mais de nature bien différente, comme celle de l'Institut Henri Poincaré, de certains Instituts Max Planck, de l'Institut de Santa Fe. Ces Instituts devraient être des structures légères […] En raison de ses missions et à l'image des Instituts dont ils s'inspirent, les Instituts des systèmes complexes ne peuvent pas être sans murs »[1530].

Tandis que l'IXXI est un GIS encore aujourd'hui et que l'ISC-PIF est devenu une UPS afférente au CNRS, le GIS RNSC est en train de se reconfigurer après le départ du CNRS. La première raison que Chavalarias donne pour expliquer une telle décision

[1526] *Ibid.*, p. 12.
[1527] *Ibid.*
[1528] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 13.
[1529] CNRS, INSERM, EP, ENS, UPMC, Paris 11, Paris 1, Institut Curie, Génopole, IHES, EHESS, ESPCI, ENS Cachan, Région Ile-de-France, « Convention constitutive du GIS 'Institut des systèmes complexes Paris Ile-de-France' », 2005, archives ISC-PIF, p. 3.
[1530] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 14.

relève d'un choix financier des partenaires, qui ne voulaient pas « cotiser deux fois », c'est-à-dire à la fois à l'ISC-PIF et au RNSC : « Les grands organismes n'aiment pas cotiser à trop de structures différentes sur un même thème, parce qu'ils ont des ressources limitées »[1531]. La deuxième raison concerne, selon lui, la fonction des GIS : s'il s'agit de dispositifs visant à faire émerger des « réseaux », une fois que cela est fait, ils n'ont plus raison de persister : « maintenant les réseaux ont émergé, et donc [le CNRS préfère] concentrer [ses] moyens sur des unités opérationnelles »[1532]. Chavalarias reporte avoir essayé, avec Bourgine et la mathématicienne Edith Perrier, directrice du RNSC jusqu'en 2014, de se tourner vers la Commission Interdisciplinarité du CNRS, « parce qu'on était convaincus que c'était le bon niveau pour financer le RNSC »[1533]. Toutefois « la commission n'a pas voulu »[1534]. Selon Sandra Laugier, cela est dû au scepticisme que le RNSC créait chez la Commission quant à la qualité de son projet scientifique et à sa mission de « faiseur de réseaux », jugée comme « un peu flou[e] »[1535]. En plus, la Commission d'avant 2010 soutenait Bourgine et son projet, alors que celle d'après devint bien plus critique à l'égard des SSC.

Encadré 12. Le rôle des feuilles de route

Tant au niveau européen qu'au niveau national, les entrepreneurs scientifiques des SSC ont utilisé les feuilles de route, parmi d'autres instruments épistémico-politiques, afin de convaincre les organismes financeurs et pour ainsi structurer la communauté. Plusieurs fois en histoire et sociologie des sciences on a mis en évidence le rôle structurant de ce dispositif rhétorique-promettant et programmatique. Par exemple Peter Miller et Tom O'Leary ont montré pour les nanotechnologies que les feuilles de route servaient à structurer et à orienter à la fois les financements à la recherche et les marchés des technosciences[1536]. Bien que dans le cas des SSC il n'y ait pas eu de marchés à créer ou à orienter, les feuilles de route européenne et française ont eu un rôle fondamental dans l'agencement des thématiques et des outils formant l'identité des SSC continentales, ainsi que dans la création de bourses doctorales et postdoctorales financées par l'Europe ou par la Région Île-de-France.

À la question directe sur le rôle de ces feuilles, Bourgine a répondu qu'elles servent pour « dire au reste du monde publiquement que tu vas te battre sur tel défi, tel sous-défi dans tel défi général, […] [dans la] création d'une nouvelle discipline »[1537]. Ceci n'est toutefois que le contenu discursif de la feuille. En réalité ce dispositif fait bien plus que cela, car les *roadmaps* ont été un outil rhétorique, opérationnel, scientifique et politique à la fois, qui a contribué à *faire exister* les SSC tout court. Le pouvoir performatif des feuilles de route, en ce qui concerne leur pouvoir de direction des financements à la recherche, est explicitement reconnu par les entrepreneurs scientifiques qui deviennent des bons sociologues d'eux-mêmes, lorsqu'ils se trouvent dans un contexte stratégique : dans une réunion du RNSC à laquelle nous avons assisté, Bourgine et Chavalarias racontaient aux autres participants que leur feuille avait été souvent adaptée dans des nombreux projets plus spécifiques au niveau national et européen[1538]. Le RNSC a organisé deux Colloques, en 2004 et en 2007, et

[1531] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1532] *Ibid.*
[1533] *Ibid.*
[1534] *Ibid.*
[1535] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[1536] Miller, P. & O'Leary, T., « Mediating instruments and making markets : capital budgeting, science and the economy », *Accounting, Organization and Society*, 2007, n. 32, pp. 701-734.
[1537] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1538] Journal de terrain des Quatrièmes Rencontres Nationales du RNSC, 17-20 novembre 2014, Hôtel Bristol, Mulhouse, France.

trois Entretiens de Cargèse avec l'ISC-PIF[1539], en 2006, en 2008 et en 2010, intitulés « Vers une science des systèmes complexes » : ces évènements ont permis d'élaborer par touches successives la feuille de route française, et, dans le même temps, d'identifier et de structurer la communauté nationale[1540]. La rencontre de Cargèse de 2008 a rassemblé soixante-dix scientifiques, qui ont produit un texte de 76 pages[1541], accompagné par la mise en place d'un portail pour la rédaction collaborative de la feuille[1542]. Ce portail a été hébergé pendant longtemps sur le site du RNSC ; aujourd'hui cette institution étant en pleine reconfiguration après la soustraction du CNRS, la feuille n'existe que sur le portail du Digital Campus for Complex Systems[1543]. Quoiqu'il en soit, elle se veut évolutive :

> « L'esprit de la feuille de route, dit Bourgine, c'est que c'est une feuille de route vivante. Donc un groupe de travail peut très bien proposer d'ajouter une question transversale […] ou d'ajouter une nouvelle famille de systèmes complexes. Et dans chaque appel d'offre de l'ISC-PIF il est bien dit que si on a une idée différente de la feuille de route on est priés de le dire et on est remerciés d'avance »[1544].

Les buts affichés de cette feuille sont celui de présenter la science de la complexité aux sphères publique, politique et industrielle, ainsi que celui de proposer des domaines de recherche qui méritent d'être investis dans les cinq ans suivants (des rencontres pour une nouvelle feuille de route ont été organisées du 19 au 23 juin 2017 avec une quarantaine de participants, pour recadrer les objets et les questions de l'ancien document[1545]).
Le texte est divisé en deux parties, une première est dédiée aux questions transversales et une deuxième est dédiée aux sujets de recherche. Comme la feuille de route européenne, éditée par Bourgine et Johnson[1546] et publiée en 2006 à l'occasion d'un projet européen[1547], la feuille de route française aborde pratiquement tous les domaines du savoir, ainsi que le secteur industriel et la finance, en proposant l'optique computationnelle des SSC comme un moyen pour résoudre un certain nombre de problèmes relevant de ces champs. Les questions, en nombre de six, sont d'ordre épistémologique ou concernent les dynamiques stochastiques et multi-échelles, les comportements collectifs, le contrôle des systèmes et la gouvernance, ou les phénomènes d'émergence, d'immergence[1548] et de résilience. Les thèmes de recherche, en nombre de dix, vont de la physique des matériaux, de la physiologie, de l'étude des écosystèmes et de la cognition, au rapport entre individus et sociétés, à l'étude des processus d'innovation, du développement durable, de la computation et des géosciences.

L'IXXI a été fondé en 2002 à l'ENS de Lyon sous le nom d'Institut des Systèmes Complexes par l'informaticien normalien Michel Morvan[1549]. À l'époque, ce dernier

---

[1539] « Il est évident que ces ateliers feuille de route ayant vocation à fédérer la recherche française, ils étaient d'abord organisés sous les auspices du RNSC en partenariat avec les ISC, mais l'ISC-PIF était un coorganisateur particulier, notamment parce qu'il fallait une feuille de route pour le DIM » : mail de David Chavalarias, 08.04.18.
[1540] CNRS, INSERM, INRA, INRIA, CEMAGREF, IRD, CGE, CPU, IFREMER, CIRAD, « Avenant n. 2 à la Convention constitutive du GIS 'Réseau National des Systèmes Complexes' », archives du RNSC, 2009.
[1541] Bourgine, P., Chavalarias, D. & Perrier, E., *French Roadmap for Complex Systems. 2008-2009 Edition*, ISC-PIF, RNSC, IXXI, 2009, en ligne sur HAL : https://hal-polytechnique.archives-ouvertes.fr/hal-00392486.
[1542] Plaquettes informatives de l'ISC-PIF, archives de l'ISC-PIF.
[1543] Présentation du Campus Numérique sur le site officiel du Complex Systems Digital Campus : http://www.cs-dc.org/cs-dc-about.html.
[1544] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1545] Page dédiée aux rencontres de 2017 pour la nouvelle feuille de route sur le site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/2017/07/compte-rendu-feuille-de-route/.
[1546] En collaboration avec une soixantaine de représentants européens et américains des SSC.
[1547] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006.
[1548] Si l'émergence est le phénomène causale ascendant des parties au tout, l'immergence est défini comme le phénomène inverse de causalité du tout émergent vers les parties le composant.
[1549] Morvan nous relate son histoire : « en 2002, pour des raisons personnelles, je décide de revenir à Lyon. J'étais bien à Paris. Mais il fallait que je trouve un poste à Lyon. L'on m'y a proposé des postes de profs. Mes contacts de là-bas, je les ai recontactés et ils m'ont dit qu'il faut que je rencontre le directeur de l'ENS. Je vais

était associé au SFI, où il s'est rendu régulièrement de 2004 à 2012. Aujourd'hui Morvan est un entrepreneur à temps plein basé à San Francisco. Si *Chaos* de Gleick avait produit des vocations aux États-Unis, la traduction française avait obtenu le même effet en France : « J'ai trouvé, relate Morvan, le livre *Théorie du chaos* par hasard, je l'ai lu en un après-midi. Là, je me suis dit que je pouvais passer mes quarante prochaines années dessus »[1550].

L'IXXI s'est transformé en GIS le 12 septembre 2006 sous le chapeau du CNRS et en partenariat avec neuf autres établissements. Logé au 46 allée d'Italie, 69007 Lyon, cet institut vise, comme son homologue parisien, à encourager la recherche interdisciplinaire autour des systèmes complexes. Cette mission se réalise par l'animation de la communauté à travers des groupes de travail, des séminaires, des colloques et des écoles d'été ; par le lancement d'appels à projets ; par l'hébergement de chercheurs et chercheuses ; par l'enseignement dans un master en systèmes complexes[1551]. Lors de sa fondation, quatre des projets financés portaient sur différentes branches de la biologie, un sur la linguistique et un sur l'emplacement des commerces en ville[1552]. En effet, au-delà des financements de l'ANR et du CNRS, Morvan espérait attirer des soutiens du secteur privé[1553]. Au début de son histoire, l'IXXI réussit à décrocher un projet avec la chambre de commerce de Lyon pour étudier l'emplacement du *Vélo'v*, le service public de vélos de la ville[1554]. Morvan put aussi lancer sa start-up COSMO, qui maintenant possède un siège à Lyon et un à San Francisco. Cependant, à l'aune de son homologue parisien et à la différence du SFI, cet institut n'a jamais réussi à intéresser de manière stable le monde des entreprises. La rhétorique de la prise de risque y est en revanche tout aussi présente qu'au SFI :

> « À l'instar de ce qui se fait aux États-Unis, l'Institut a fait le pari d'une recherche qui démarre, qui prend des risques, et qui accepte l'idée que tous les projets ne vont

---

voir le directeur avec un projet. Je lui ai dit, moi ça m'intéresse de revenir, mais pas pour faire ce que je faisais avant. Si je reviens, c'est parce qu'en fait mon gros projet maintenant, c'est de créer un institut des systèmes complexes. Et je veux créer cet institut, c'est ça mon projet scientifique. Donc soit tu me dis que ça t'intéresse que je vienne le faire à l'ENS, soit tu me dis que ça ne t'intéresse pas, c'est pas grave. Je ne voulais pas aller à Lyon pour refaire ce que j'ai déjà fait, avant, ça ne m'intéressait pas. Je voulais avoir un projet pour y aller. Il a dit : 'C'est génial, ça m'intéresse, viens'. J'arrive à l'ENS, je commence à créer l'institut des systèmes complexes, d'abord informellement, je commence à créer un séminaire, un colloque, j'invite des gens. Mon idée était de ne pas faire une création administrative tant que la science n'était pas là. C'est pour cela que l'institut n'a été créé légalement qu'en 2007 ou 2008 alors que je suis arrivé en 2002. Mon truc était de dire, je veux faire une animation scientifique autour des systèmes complexes d'abord, à partir du labo d'informatique, des gens qui étaient là. Quand j'aurais créé une communauté sur ce sujet, je créerai formellement et administrativement l'institut » : entretien avec Michel Morvan, 03.10.16.

[1550] *Ibid.*

[1551] Site officiel de l'IXXI : http://www.ixxi.fr/?page_id=342 ; IXXI, « Quelle forme pour les plates-formes scientifiques ? », Power Point, archives IXXI, ~2009.

[1552] IXXI, « Communiqué de presse. L'Institut rhônalpin des systèmes complexes au cœur de la recherche du 21ème siècle ! », 2005.

[1553] Entretien avec Michel Morvan sur le site de Daily Motion : http://www.dailymotion.com/video/x440xz_interview-du-directeur-de-l-ixxi-su_tech#.UYrLkcqGThV.

[1554] Mail de Sébastian Grauwin, 08.05.13.

pas marcher. Grâce à sa souplesse de fonctionnement, il finance l'amorçage de projets originaux qui permet aux plus fous, aux plus créatifs, d'avoir enfin une chance d'exister »[1555].

Dès sa fondation, l'Institut put vanter 250 associés, dont 40 en résidence, et un budget de fonctionnement de 300.000 euros par an, mis à part les salaires (payés par les institutions de rattachement des membres) et les projets nationaux et européens[1556]. Aujourd'hui les associés sont autour de 200, les résidents une trentaine[1557] et le budget de fonctionnement est descendu à 120.000 parce que, comme le dit le physicien Pablo Jensen qui est l'un des membres du comité exécutif, « il n'y a plus [à payer] le loyer très couteux »[1558]. Fortement ancré sur la physique et l'informatique, et sur leurs applications aux autres disciplines, l'IXXI met aujourd'hui beaucoup moins l'accent sur la science des systèmes complexes que sur la science des réseaux (complexes).
Le CREA avait été la caution institutionnelle et symbolique pour rendre crédible l'entreprise des SSC. Lorsque l'ISC-PIF s'installe dans les locaux de 57-59 rue Lhomond à Paris, Bourgine a encore une fois besoin du CREA, puisque ce dernier put en effet jouer le rôle de garant pour les baux du GIS :

« On a eu des problèmes avec les locaux au début car on devait garantir de pouvoir payer le loyer pour la durée d'un bail. Les budgets de l'État sont annuels, alors que les baux sont triennaux. On a donné les projets européens du CREA comme garantie, au cas où les partenaires cessaient d'appartenir au GIS. La première moitié des six mois de luttes a concerné cet aspect »[1559].

Après la fermeture du CREA, le GIS de l'ISC-PIF sera adossé au CAMS de l'EHESS, avant de devenir une UPS du CNRS. Mathieu Leclaire, ingénieur de recherche au CNRS associé à l'ISC-PIF et à Géographie-Cités (Sorbonne), explique que Paris semblait s'imposer lorsqu'il fallut trouver des locaux à l'institut :

« l'intérêt politique, c'était d'aller à Palaiseau parce qu'il y a le regroupement de tous les laboratoires, les écoles, avec sûrement de l'argent qui était donné pour faire ce mouvement-là. […] [Mais] après il y avait l'intérêt des gens qui faisaient l'institut aussi, c'est-à-dire les gens qui y travaillaient au jour le jour. […] c'étaient des gens qui étaient beaucoup à Paris, qui avaient envie […] de pouvoir être au carrefour à la fois des labos qui étaient dans Paris et de juste autour de Paris, et ça avait vraiment du sens d'être à Paris. On se disait : tu refais ce labo-là à Palaiseau

[1555] IXXI, « Communiqué de presse. L'Institut rhônalpin des systèmes complexes au cœur de la recherche du 21ème siècle ! », 2005.
[1556] *Ibid.*
[1557] Mail de Pablo Jensen, 24.03.18.
[1558] Mail de Pablo Jensen, 25.03.18.
[1559] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.

> […] [le télétravail] aurait encore augmenté d'une part. Et d'autre, le côté interaction et convergence de plein de choses serait tombé quoi »[1560].

Dans la Convention établissant le GIS de l'ISC-PIF, la métaphore qualifiant l'institut de « tête de pont » donne immédiatement une idée du style stratégique des entrepreneurs scientifiques des SSC français. La métaphore est issue du génie civil (appareil d'appui) et du monde militaire (dispositif de conquête) :

> « L'objet du GIS est d'une part d'être un lieu rassemblant des chercheurs issus de disciplines différentes travaillant ensemble sur les systèmes complexes (d'un point de vue appliqué et fondamental) et d'autre part d'être la tête de pont d'un réseau dans la région Île de France regroupant tous les acteurs académiques ou privés impliqués sur le sujet »[1561].

Quels objectifs et quels thèmes de recherche se pose donc l'ISC-PIF ? Bourgine cible les objets d'étude des SSC : « nous on prend le travail entre les deux infinis »[1562]. Si les frontières des objets d'études sont donc pour le moins vastes, les objectifs de recherche concrets viennent à être bien explicités dans l'appel d'offre DIM pour les allocations doctorales gérées par l'ISC-PIF :

> « Seront privilégiés les projets susceptibles d'apporter des connaissances, méthodes et outils nouveaux. L'originalité et la prise de risque seront également considérées de manière privilégiée. Les résultats attendus à terme sont des modèles de plus en plus intégrés, explicatifs et prédictifs des systèmes complexes »[1563].

La « prise de risque » fut possible grâce à la relative liberté qu'assurait à l'ISC-PIF le dispositif du DIM, sur lequel il faut maintenant se pencher.

Le DIM des systèmes complexes

Les DIM ont été mis en place par la Région Île-de-France en 2005 à l'initiative de Marc Lipinski, directeur de recherche au CNRS et à l'époque conseiller régional, pour faciliter les relations entre laboratoires situés en région parisienne et afin de soutenir et développer un secteur scientifique déterminé[1564]. Le DIM « Problématiques transversales aux systèmes complexes » a été labélisé une première fois en juin 2005 et

[1560] Entretien avec Matthieu Leclaire, 13.02.17.
[1561] CNRS, INSERM, EP, ENS, UPMC, Paris 11, Paris 1, Institut Curie, Génopole, IHES, EHESS, ESPCI, ENS Cachan, Région Ile-de-France, « Convention constitutive du GIS 'Institut des systèmes complexes Paris Ile-de-France' », 2005, archives ISC-PIF, p. 3.
[1562] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1563] Source : http://www.iscpif.fr/tiki-download_file.php?fileId=774.
[1564] Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.

une deuxième fois en novembre 2011. Depuis son démarrage, ce DIM reçut plus de dix millions d'euros par la Région[1565]. Lors de l'un des nos premiers entretiens avec lui, Bourgine vantait un DIM à cheval entre plusieurs autres, ainsi que l'un des plus financés :

> « Les avantages d'avoir la tutelle de la Région sous le DIM ne sont pas seulement celles d'avoir tous les ans une enveloppe régionale avec laquelle embaucher des doctorants et des post-doctorants, ou d'acheter des équipements. C'est aussi celle d'avoir un rapport plus fort avec les autres DIM et donc de mieux jouer notre rôle interdisciplinaire. On a eu le plus gros équipement que la Région n'ait jamais donné, coûtant deux millions d'euros, qu'on gère avec quatre autres DIM, ça ne s'était jamais vu. Cela est typique de ce qu'on est capable de faire »[1566].

Chaque labellisation dure cinq ans, pendant lesquels le DIM coordonne un programme de financement d'allocations doctorales et postdoctorales, d'événements scientifiques (colloques, journées portes ouvertes, etc.) et de structures et instruments techniques. Parti avec quatorze partenaires, l'ISC-PIF en compte dix-neuf aujourd'hui.
Le linguiste Yves-Marie Visetti pense que les SSC « n'ont toujours pas une reconnaissance scientifique, c'est-à-dire que l'ensemble des autres disciplines les regardent de haut, comme des gens fumistes, des gens pas très solides dans leurs propositions »[1567]. Si nous avons entendu cette opinion sur les SSC plusieurs fois dans les milieux scientifiques, pourquoi autant de soutien régional, national et européen pour ces sciences « fumeuses » ? En ce qui concerne les DIM, nous avons rencontré Isabelle This Saint-Jean, qui a été présidente de l'association Sauvons la Recherche en 2009, secrétaire générale du Parti Socialiste pour la Recherche et surtout Vice-présidente du Conseil régional en charge de l'Enseignement supérieur et de la Recherche de l'Île-de-France. Pendant ses fonctions à la Région, elle avait mis en place un conseil scientifique pour une évaluation autonome et non politique de la recherche. Elle revendique la mise en place de ce conseil – composé de vingt personnes, choisies en raison des principes de la parité homme-femme et du pluralisme disciplinaire[1568] – non seulement pour honorer sa vision d'une recherche autonome,

---

[1565] « Le soutien de la Région Ile-de-France à l'ISC-PIF depuis 2005 est de 9.785.541€, répartit en 4.872.350€ en fonctionnement et 4.913.191€ en investissement, ce qui a permis de financer des allocations de recherche (3.187.700€), l'animation et le fonctionnement du réseau (1.684.650€), des équipements scientifiques (4.913.191€), principalement des clusters informatiques, et des travaux d'aménagements des locaux de la Ville de Paris. Plus particulièrement, depuis sa nouvelle labellisation en 2011 (programme 2012 et 2013), le DIM 'Problématiques transversales aux systèmes complexes' a bénéficié de 1.899.241€ de subventions, répartit en 1.476.950€ en fonctionnement et 422.291€ en investissement, qui ont permis de financer 6 allocations doctorales (613.200€), 9 allocations post-doctorales (615.600€) et 7 petits et moyens équipements (422.291€) » : *ibid.*
[1566] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1567] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1568] « On avait vingt membres, strictement paritaire homme-femme, avec un équilibre disciplinaire, un peu toutes les disciplines. […] J'avais souhaité que ça soit très sérieux, il y avait des très grandes personnalités scientifiques. Il y avait Denise Pumain. Il y avait Ferret qui est prix Nobel de chimie. On a essayé de faire en

régie par les scientifiques eux-mêmes, mais aussi pour marquer une discontinuité par rapport à la méthode « au fil de l'eau » qui avait été employée jusque-là pour constituer les DIM :

> « Quand moi je suis arrivée j'ai estimé que c'était un bon dispositif, qu'il fallait le maintenir, mais qu'il fallait un peu remettre les choses à plat, parce que les différents Domaines d'Intérêt Majeur avaient été créés un peu au fil de l'eau, en fonction des rencontres et moi je considère que c'est pas comme ça qu'il faut faire les choses, donc […] d'abord j'ai installé le conseil scientifique à mes côtés, c'est-à-dire que c'est pas à moi de juger de l'activité scientifique […] même si c'est aux élus de mettre des priorités politiques »[1569].

Ayant fait une thèse à cheval entre l'économie, la sociologie et la philosophie sur le problème de l'autoréalisation (thématique traitée par certains anciens membres du CREA comme Orléan, Walliser, etc.), et ayant postfacé un livre de Mark Granovetter (l'un des pères de la théorie des réseaux), This Saint-Jean n'était pas insensible aux problématiques de l'interdisciplinarité et de la formalisation des SHS. Cela ne l'a pas empêchée d'avoir eu des réserves à l'égard des SSC, à titre personnel et indépendamment des décisions de son conseil scientifique. Elle nous a raconté que, lorsqu'il a fallu ré-labelliser le DIM systèmes complexes, des débats animés ont divisé le conseil :

> « Il y a eu cinquante dossiers qui ont été expertisés et on a ré-labellisé seize domaines et dans ces domaines le DIM systèmes complexes, qui avaient été créé avant mon arrivée, a été reconfirmé par le conseil scientifique avec une discussion assez forte […] Moi j'avais été saisie de la part d'un certain nombre de collègues d'une interrogation extrêmement forte sur la pertinence de ce DIM et sur sa crédibilité et son sérieux »[1570].

This Saint-Jean a pris ses distances des SSC en raison de deux événements. D'une part, à cause de certaines pratiques de lobbying qu'elle dit ne pas avoir appréciées. D'autre part, elle met en doute la validité du contenu scientifique de ce domaine, en partie en fonction de l'opinion de certains scientifiques qui lui avaient fait part de leurs réserves :

---

sorte que ça soit pas que la montagne Sainte-Geneviève-Saclay mais que ça soit un peu l'ensemble de l'Île-de-France et puis il y avait une partie du conseil scientifique qui était à l'extérieur de l'Île-de-France, de façon à ce qu'il y ait un peu de neutralité dans le conseil. Nous ce qu'on avait fait c'est d'identifier le Président du conseil scientifique, en discutant avec lui on avait composé le conseil […] ça s'est fait en bonne intelligence, moi j'avais suggéré des noms, lui il les avait acceptés, il en a conseillé d'autres […] Le conseil scientifique avait donné une charte éthique tout à fait stricte où les membres du conseil qui étaient en conflit d'intérêts quittaient la salle » : entretien avec Isabelle This Saint-Jean, 27.02.17.

[1569] *Ibid.*

[1570] *Ibid.*

> « c'était des collègues scientifiques, notamment des matheux, je peux pas faire des noms mais c'est une musique qui est venue à plusieurs reprises comme quoi [les SSC] c'est foireux, c'est pas très sérieux. C'était particulièrement important qu'il y ait un conseil scientifique qui se prononce et qui valide ou invalide ce domaine. Le conseil scientifique s'est prononcé. […] je n'ai pas souhaité du tout remettre en cause aucune des expertises du conseil scientifique, donc je les ai prises pour argent comptant […] [Mais mes amis mathématiciens avaient] le sentiment que moi j'avais aussi, est-ce que le roi est nu ? […] Est-ce que c'est une immense arnaque ou est-ce que ça mérite d'être creusé, est-ce qu'il y a vraiment de recherche propre, spécifique etc. ? »[1571].

Jean-Antoine Girault, un neurologiste qui fut membre du conseil scientifique du dispositif DIM, explique de son point de vue ce sur quoi portait le débat et livre son opinion sur les SSC, qui est plutôt positive :

> « En effet, il y avait des opinions variées (mais pas un débat idéologique !), ce qui est souvent le cas, sur la biologie des systèmes dont certains considèrent/aient que ça n'est pas un 'domaine scientifique' à part entière mais plutôt un mélange d'analyses quantitatives assez diverses dans différents domaines sans que cela mérite une véritable identification… D'autres, dont je faisais partie, avaient une attitude beaucoup plus pragmatique, pensant qu'il y avait une forte valeur ajoutée scientifique à encourager et à renforcer des approches mathématiques transdisciplinaires qui faisaient déjà la preuve de leur efficacité et de leur créativité. Nous pensions que c'était aussi une façon de renforcer les dialogues et les échanges interdisciplinaires et le développement d'outils et de concepts originaux et féconds… »[1572].

La conclusion du rapport déclarant aux porteurs du DIM systèmes complexes sa ré-labellisation motivait cette décision en raison des succès déjà atteints en termes d'innovations « applicatives »[1573]. En même temps, le conseil recommandait aux porteurs du projet de « veiller à consolider ses avancées scientifiques »[1574].

La Commission Européenne

Du côté de Bruxelles, le soutien a été moins conflictuel et controversé. Non seulement les fonctionnaires du département de la recherche de la Commission Européenne ont

[1571] *Ibid.*
[1572] Mail de Jean-Antoine Girault, 26.03.18.
[1573] « Il s'agit d'un domaine innovant aux applications multiples dont certaines ont déjà été mises en œuvre avec succès » : Conseil scientifique du DIM Région Ile-de-France, « Conclusion transmise aux porteurs du DIM Problématiques transversales aux systèmes complexes », archives de Jean-Antoine Girault, 2011.
[1574] *Ibid.*

une plus grande liberté de mouvement ; les fonctionnaires que nous avons rencontrés étaient aussi fortement convaincus de l'intérêt des SSC. Lassègue rappelle que « Bourgine a étendu, donné plus de poids à [la] partie systèmes complexes [du CREA] en allant à Bruxelles et en participant aux gros appels d'offre européens et ça a très bien marché »[1575] ; Visetti corrobore : « il faut reconnaître, bien joué »[1576]. Plusieurs de nos interviewés, tantôt ceux proches de Bourgine tantôt ceux qui lui étaient plus ou moins hostiles, s'accordent pour lui reconnaître une dextérité particulière dans la collecte des fonds : « [Bourgine], dit Alessandro Sarti, a une certaine dose de vision, couplée à une rhétorique de la science qui lui permet de parler à un public assez vaste. À savoir : hommes politiques et scientifiques »[1577]. Mais le succès du lobbying des entrepreneurs scientifiques des SSC françaises auprès des fonctionnaires de la Commission n'était pas dû seulement au pouvoir persuasif de Bourgine. Déjà parce qu'il n'était pas seul dans cette mission : à ses côtés, parmi d'autres, il faut mentionner Michel Morvan, Jeffrey Johnson, l'informaticien Pierre Collet et le directeur actuel de l'ISC-PIF, David Chavalarias. Deuxièmement, comme nous l'avons vu, la voie européenne avait été ouverte par l'« imprimante » de l'ENS qui mit en relation Weisbuch avec le postdoctorant viennois, Ralph Dum.

Dum, qui est d'origine autrichienne, nous amène à Bruxelles, où il n'est pas le seul à soutenir les SSC. Nous avons rencontré, avec lui, José-Luis Fernandez-Villacañas. Après avoir séjourné au National Institute of Standards and Technology aux États-Unis et à l'ENS pour travailler sur l'optique quantique et les atomes froids, Dum est invité à Bruxelles pour développer un programme sur l'ordinateur quantique et y est enfin resté[1578]. Ayant connu les systèmes complexes à Paris à travers Weisbuch, il approfondit la thématique en s'intéressant notamment aux recherches de physique statistique sur l'Internet vu comme un réseau complexe. Il décide ensuite de monter des programmes de recherche européens pour fomenter l'étude de cette question : « Du coup j'ai convaincu les gens ici qu'il faut mieux comprendre les sciences des systèmes complexes pour mieux comprendre Internet. […] on a aussi financé des choses en Intelligence Artificielle et en robotique »[1579]. Si Dum avait été socialisé aux SSC par la communauté française, Fernandez-Villacañas le fut par la communauté américaine du SFI.

Après avoir fait son doctorat en physique théorique à Oxford, notre interlocuteur espagnol fut embauché dans l'industrie, où il se mit à chercher des inspirations biologiques pour trouver des solutions alternatives dans la gestion des systèmes de télécommunication[1580]. Il nous a raconté être ainsi tombé sur un article de Per Bak et d'avoir ensuite assisté à des séminaires avec Murray Gell-Mann et d'autres personnes

[1575] Lassègue, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1576] Visetti, dans l'entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
[1577] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[1578] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1579] *Ibid.*
[1580] Fernandez-Villacañas, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.

liées au SFI. Venu à Bruxelles pour présenter les recherches de son laboratoire R&D de British Telecom, on lui offrit un poste pour développer des programmes dans les technologies de télécommunication au niveau européen. L'Agence Exécutive pour la Recherche, à laquelle les deux fonctionnaires appartiennent, se compose de vingt-sept directeurs généraux, qui rendent compte aux commissaires européens. Ceux-ci ont une fonction politique semblable à celle des ministres et sont nommés politiquement. Deux sur vingt-sept directorats généraux financent dans le continent des projets de recherche fondamentale à visée « applicative ».
Les premiers financements pour les SSC étaient donc liés à l'étude de l'Internet. Ce fut le tour ensuite de la vie artificielle (aux bénéfices de la biologie de synthèse), puis des systèmes sociotechniques (télécommunications, énergie, etc.), tandis que le dernier projet portait sur les dynamiques multi-échelles des systèmes complexes : « The last proactive initiative that we had in FP7 was Dynamics of multiscale complex systems and that was roughly the last theoretical effort from the Commission to push complex systems science »[1581]. Si aujourd'hui il n'y a plus de programmes sur les SSC, Dum pousse pour une application de ce domaine à la finance, au climat et à la politique, à travers le soutien de ce qui a été nommé « Global Systems Science » :

> « La raison pour laquelle je suis resté [à la Commission] c'est qu'on peut monter des programmes qui sont intéressants. Comme la Global Systems Science, qui est l'application des systèmes complexes à la politique. Après la crise financière de 2008, je me suis dit, bon tout le monde a compris que c'était un problème de hyper-connectivity des banques. Pour ça la Lehman Brothers a entrainé d'autres banques vers la faillite. Après j'ai lancé ce programme systèmes complexes et finance. On a compris que la méthode systèmes complexes s'applique aussi au climat, etc. Donc j'ai fait ce programme Global Systems Science. […] [qui a intéressé] l'OCDE »[1582].

Les programmes – FP5, FP6, FP7, puis Horizon 2020 – durent de trois à quatre ans, doivent impliquer au moins trois États de l'UE et se structurent en sous-programmes, tels que FET ou NEST, dans le contexte desquels des appels à projet sont lancés. Interrogés sur les raisons qui les ont portés à soutenir les SSC, les deux fonctionnaires que nous avons rencontrés donnent des réponses assez différentes, plus théorique celle de Fernandez-Villacañas et plus pragmatique celle de Dum. Le premier invoque le défi scientifique que représentent ces systèmes composés de nombreux éléments hétérogènes :

> « I was inspired by this issue of trying to control large scale systems with many different components and what these people were saying was, 'Hey guys, you can't

[1581] *Ibid.*
[1582] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.

> really predict how these systems are going to behave from knowing the individual parts of the systems'. It was more like using this negative argument that you cannot really work out these systems properly without taking all these sides into account. It was a struggle, because we were not coming with a specific solution, we were coming with a problem. So it has been a battle to try to convince people to put money into areas for which there is no specific technological solutions ready »[1583].

Quant à Dum, il oppose les SSC « appliquées », qu'il a contribué à financer, aux SSC originaires, qu'il juge plus théoriques et spéculatives : « instead of playing with artificial life, instead of philosophizing about cybernetics, what real issues you can address ? What we have been pushing here is complex systems as a methodology to get things done »[1584].
Dans l'histoire européenne des SSC, l'imprimante de l'ENS laisse graduellement la place à Bourgine ; comme le témoigne Dum : « we had contacts with Bourgine. We were working closely together. […] We were funding the ISC[-PIF] via a coordination action with Bourgine who was the coordinator. I was often at his institute and I was very interested in it »[1585]. Bourgine fut, avec Johnson, aussi l'un des évaluateurs des projets FET[1586]. Il y eut une trentaine de projets financés[1587], au cours d'une douzaine d'années à hauteur de plus de 100 millions d'euros sur les thèmes les plus divers. Puisqu'il est impossible de rendre compte de tous les projets, nous en mentionnerons quelques uns à titre d'exemple. Si les tout premiers étaient des projets qui visaient uniquement à structurer la communauté européenne des SSC, les programmes successifs visèrent à des réalisations concrètes, notamment dans les secteurs pharmaceutique, économique ou informatique. Par exemple, le projet Non-Equilibrium Social Science in ICT and Economics (NESS), financé par FP7 de 2011 à 2014, ambitionnait à fédérer les communautés des SSC, des théories économiques alternatives et des MBA autour de l'étude formalisée de l'économie, ainsi qu'à tisser des liens de collaborations entre les scientifiques, les décideurs politiques et les entrepreneurs :

> « Traditional economics uses models that assume limited interaction between agents, simplistic behavioural assumptions and equilibrium analysis. […] For many years researchers from diverse disciplines and communities, such as Complex Systems, non-orthodox Economics and Agent-Based Modelling have proposed alternative formalised models that capture aspects of non-equilibrium social systems yet these endeavours have been fragmented and peripheral. With this co-ordination

[1583] Fernandez-Villacañas, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1584] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1585] *Ibid*.
[1586] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1587] Mail de Jeffrey Johnson, 23.03.18.

> action we will bring together leading researchers within Non-Equilibrium Social Science (NESS) to build a community, address current pressing issues and engage with policy makers, business and other stakeholders »[1588].

Le projet Complex Systems for an ICT-enabled Energy System, financé par FP7 de 2009 à 2011, visait à fédérer les communautés des technologies de l'information et de la communication, des SSC et de l'énergie pour fournir aux décideurs politiques des modèles (par réseaux et MBA) « réalistes, robustes et flexibles » des systèmes sociotechniques, afin d'assurer les objectifs de soutenabilité, compétitivité et sécurité d'approvisionnement[1589]. Un projet encore antérieur, de 2004 à 2008, s'intitulait *Programmable Artificial Cell Evolution* et se posait comme objectif la simulation de proto-cellules pour ensuite en construire des réelles à partir de l'exploration évolutive de réactions chimiques[1590].

Encadré 13. Le rôle des financements de l'Agence Nationale de la Recherche

L'ANR a joué elle aussi un rôle dans le soutien aux SSC, bien que moins important. Le programme SYStèmes COmplexes et Modélisation Mathématique (SYSCOMM) a financé en 2008 vingt projets, qui ont porté sur l'acoustique, sur les rythmes cardiaques, sur les dynamiques de villes, sur les dynamiques d'opinion, sur la physique des matériaux, sur les services écosystémiques, sur le trafic citadin ou sur la morphogenèse végétale[1591]. La présentation du programme SYSCOMM puise des SSC, mais en propose une version plus modeste et prudente :

> « Le programme SYSCOMM, en rapprochant méthodes de mathématiques appliquées, informatique fondamentale, concepts de physique statistique et données expérimentales sur des systèmes complexes, vise à appréhender, en se fondant sur des modélisations 'simplifiées', des systèmes impliquant des échelles multiples de temps et d'espace et des interactions entre différents 'milieux', et/ou pouvant consister en un grand nombre d'entités simples en interaction présentant des propriétés émergentes. Les approches visées, tout en faisant l'économie des simulations numériques très lourdes auxquelles on a habituellement recours pour décrire les systèmes complexes, doivent en améliorer la compréhension. Elle peut aussi fournir de nouveaux outils pour comprendre, éventuellement décrire de manière quantitative ou même prédire des effets qui semblent hors de portée de la science actuelle »[1592].

Les projets sur les systèmes complexes ayant été financés par l'ANR avant et après 2008 dépassent largement la liste de SYSCOMM. Toutefois les cadres dans lesquels ils ont été soutenus n'affichaient pas les SSC dans le titre des programmes.

[1588] Page officielle du projet NESS : https://cordis.europa.eu/project/rcn/102344_en.html.
[1589] Page officielle du projet ComplexEnergy : https://cordis.europa.eu/project/rcn/92306_en.html.
[1590] Page officielle du projet PACE : https://cordis.europa.eu/project/rcn/74624_en.html.
[1591] La liste officielle des projets financés par l'ANR dans le cadre de SYSCOMM en 2008 : http://www.agence-nationale-recherche.fr/fileadmin/user_upload/documents/aap/2008/finances/syscomm-2008-resumes.pdf.
[1592] Page officielle de SYSCOMM sur le site de l'ANR : http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/historique-des-appels-a-projets/appel-detail1/programme-systemes-complexes-et-modelisation-mathematique-syscomm-2008/.

L'importance des projets européens réside dans le fait qu'ils permettent de monter des équipes dans des laboratoires et de fédérer des communautés internationales pendant quelques années. Avec la disparition des programmes fléchés SSC, celles-ci perdent un support institutionnel et financier important. L'un des fiefs du domaine, en France, est sans doute l'ISC-PIF qui, après avoir failli disparaître plus d'une fois, s'est constitué en Unité Propre de Service à partir du 1 janvier 2014[1593]. De tous les instituts de la complexité présents en France, il est le plus structuré et stable. Dans cette pérennisation, le rôle majeur a été joué par le CNRS et secondairement par la Région Île-de-France et la Ville de Paris. Si quand on parle de Région, nous pensons aux DIM, et quand on parle de Paris, nous pensons à la commission territoriale qui a pourvu à l'ISC-PIF des locaux à bas prix, du côté du CNRS nous faisons référence à l'InSHS. Les « succès » affichés par l'ISC-PIF concernent en effet dans une large mesure les SHS : mise à part la plateforme BioEmergence, qui mène des recherches d'imagerie embryonnaire, les deux impacts les plus importants des SSC parisiennes, jusqu'à aujourd'hui[1594], sont la plateforme OpenMOLE et les logiciels développés en partenariat avec le Laboratoire Géographie-Cité de la Sorbonne[1595]. OpenMOLE (encadré 14) se définit comme une « plateforme transversale pour le 'calcul intensif' », aussi appelé calcul parallèle, et sert à explorer statistiquement les modèles numériques des scientifiques usagers qui y ont accès, indépendamment de la discipline d'application, pour en tester les hypothèses sous-jacentes. Quant aux collaborations entre les informaticiens de l'ISC-PIF et les géographes quantitativistes de l'UMR Géographie-Cité, elles ont mené au développement de plusieurs MBA finalisés à la reconstruction de l'évolution de systèmes de villes.

Or, si on revient un instant à l'IXXI de Lyon et qu'on lit le communiqué de presse le décrivant, l'on se souvient immédiatement du SFI : « L'Institut n'a pas de paillasse pour faire des expérimentations. Les chercheurs de l'Institut restent dans leur laboratoire et les activités de recherche sont faites au titre de ces laboratoires »[1596]. Nous avons montré que si l'identité des SSC aujourd'hui est celle d'un domaine éminemment computationnel et théorique, cela est surtout le produit d'une contingence relative à l'histoire du dernier siège du SFI : les riverains du *Cowan Campus* ne voulaient pas de laboratoires de sciences naturelles pour des raisons de

[1593] Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.

[1594] « C'est assez vrai en ce moment, mais ce ne l'était pas dans les premières années où les principaux projets étaient en biologie et agronomie […] Ce qu'on observe, c'est plutôt des vagues de différentes communautés qui s'appuient sur les plateformes de l'ISC-PIF pour adopter de nouvelles méthodologies et se développer. Après la bio, il y a eu les géographes. Maintenant c'est effectivement beaucoup des sciences sociales computationnelles et humanités numériques » : mail de David Chavalarias, 08.04.18.

[1595] Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.

[1596] IXXI, « Communiqué de presse. L'Institut rhônalpin des systèmes complexes au cœur de la recherche du 21ème siècle ! », 2005.

sécurité. Maintenant, si l'ISC-PIF, qui tout comme le SFI et l'IXXI ne contient pas de laboratoires, a pu être pérennisé et se spécialiser dans les SHS, cela est dû à une autre contingence : le support que l'InSHS a décidé d'assurer à cette UPS. Il s'agit d'en étudier les raisons, que Romain Reuillon synthétise ainsi : « On s'est bien positionnés sur la partie […] méthodes numériques pour les sciences sociales. C'est un peu ça qui a dû bien jouer, je pense. On est rattaché à l'InSHS »[1597].
La courte présentation de l'ISC-PIF d'aujourd'hui définit le contexte, la méthode et les finalités des SSC dont il se veut porteur :

> « L'avènement de l'ère des grandes masses de données (le 'Big-Data'), les progrès considérables dans le domaine du calcul numérique haute performance ainsi que les enjeux de participation citoyenne et d'ouverture des données publiques ouvrent de nouvelles perspectives à l'étude de ces systèmes »[1598].

Le contexte est donné par la montée des *Big Data*, la méthode par les techniques computationnelles qui permettent d'exploiter ces masses de données et les finalités portent sur les enjeux de la participation citoyenne. Marcel Skrobek, dernier secrétaire général du CREA, nous a confié que les discussions au sein du laboratoire de l'EP avaient déjà porté sur la stratégie à adopter pour empêcher la disparition de l'ISC-PIF avec la fin du GIS. En particulier Skrobek avait conseillé à Bourgine de regarder du côté des Fondations, qui sont pérennes, financièrement autonomes et capables d'embaucher du personnel[1599]. Ce chemin ne fut pas exploré à temps, Bourgine prit sa retraite et il dut laisser à Chavalarias la tâche de prendre la relève. C'est surtout ce dernier qui a dû gérer le tournant vers la pérennisation de l'ISC-PIF.
Avec des études de mathématiques et d'informatique à l'ENS Cachan, un DEA en sciences cognitives et une thèse à l'EP en sciences cognitives et systèmes complexes dirigée par Bourgine, Chavalarias a été enrôlé tôt dans l'entreprise des SSC. Il fut d'abord embauché pour développer plusieurs outils en ligne : « j'étais monsieur Wiki pendant quelques temps »[1600]. Graduellement, enchaînant un contrat après l'autre grâce à Bourgine, Chavalarias est chargé de tâches de coordination et devient l'une des chevilles ouvrières de toute l'entreprise fondatrice des SSC en France. Il est finalement recruté par le CNRS et associé au CAMS de l'EHESS. Depuis le 1er janvier 2013 il dirige l'ISC-PIF, après avoir été postdoctorant dans ce même institut et directeur adjoint pendant deux ans. Transformer le GIS en UPS n'a pas été une entreprise facile d'après son témoignage : « entre 2013 et 2015, on a eu une transition hyper-

[1597] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1598] Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.
[1599] Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
[1600] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.

violente »[1601]. Les GIS sont renouvelés d'année en année, tout comme le bail de rue Lhomond où logeait l'ISC-PIF. Lorsque le GIS touchait à sa fin en 2013, l'ISC-PIF a failli disparaître à cause des loyers. Un changement de fonctionnement dans le DIM avait compliqué les choses :

> « En 2013 tout le monde pensait que [l'ISC] allait fermer. Parce que la Région avait changé ses règles de financement des DIM, depuis 2011 […] la Région ne finançait plus les loyers. C'est tout bête, mais nous on avait rue Lhomond, […] 90.000 euros par an rien que pour le loyer […] à partir du moment où la Région ne contribuait plus à ça, on a eu du jour au lendemain 40.000 euros de trou dans l'année. Entre 2011 et 2013, nos ressources propres ont fondu, moi j'ai même hypothéqué des projets, parce que le CNRS demande à l'unité d'avoir un an d'avance de trésorerie pour renouveler un bail. […] en juin 2013 on n'avait plus rien en gage, donc je savais que fin 2013, si on ne trouvait pas de solution, on allait mettre la clé sous la porte et on s'arrêtait »[1602].

Pour Chavalarias, il a fallu travailler sur trois fronts : CNRS, Région et Mairie.
Si Sandra Laugier, qui avait suivi l'affaire du CREA, supportait l'initiative de l'ISC-PIF, son supérieur, Patrice Bourdelais, et les autres membres de la direction de l'InSHS devaient être convaincus, comme l'explique Chavalarias :

> « le réseau systèmes complexes, les partenaires, les représentants étaient satisfaits, à l'InSHS aussi ils trouvaient que c'était bien, mais tu sais c'est toujours pareil, quand tu veux créer des nouvelles structures en France ou n'importe où, comme à chaque fois c'est de l'investissement et c'est un petit peu des oui ou non, t'as toujours des hésitations »[1603].

Selon Laugier, « Bourdelais […] [n']a jamais vraiment cru [aux SSC] »[1604], en partie parce que plusieurs personnalités du CNRS ne voyaient pas de bon œil ce domaine : « c'est pour ça qu'il s'est pas énormément investi, ça s'est fait petit à petit »[1605]. De son côté, Laugier a des mots très positifs vis-à-vis des SSC, qu'elle voit comme un domaine à la fois scientifique, épistémologique et « applicatif », source d'innovations et d'inspiration pour les jeunes chercheurs et chercheuses :

> « C'est un domaine émergent très interdisciplinaire qui produit toute sorte d'applications, qui sont très innovantes, mais qui est aussi un milieu de réflexion

[1601] *Ibid.*
[1602] *Ibid.*
[1603] *Ibid.*
[1604] Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
[1605] *Ibid.*

épistémologique. Beaucoup de gens critiques disaient que c'est pas de la science, c'est que de l'application, alors que je pense que c'est un lieu d'innovation scientifique mais qui a l'intérêt d'être aussi extrêmement concret, applicatif, et qui suscite beaucoup de créativité de la part de ceux qui sont jeunes chercheurs »[1606].

Laugier compare les SSC aux sciences cognitives pour ce qui est du volet interdisciplinaire, mais les met en opposition en ce qui concerne les résultats scientifiques, qu'elle juge insuffisants pour les deuxièmes. En revanche, ces deux domaines partagent, d'après la philosophe, une même ambition à « être une sorte de paradigme unique de la pensée en sciences sociales »[1607]. Elle rétorque que « c'est absolument pas le cas [car] il y a beaucoup d'autres façons de faire des sciences sociales »[1608]. Laugier a donc voulu soutenir les SSC, mais elle a également voulu veiller à qu'elles n'envahissent pas tous les autres domaines :

« On a réussi à recadrer les choses. [Bourgine] pensait que les systèmes complexes allaient devenir un grand paradigme, qui allait tout embrasser. En SHS en particulier. Évidemment que ça pouvait pas passer. […] Du coup il y a eu une réaction inverse, d'éjecter les systèmes complexes, alors que c'est vraiment une forme de méthode et de recherche en SHS qui est extrêmement féconde et qui attire beaucoup de jeunes chercheurs. Ce qu'il fallait c'était de les garder à leur juste place, c'est-à-dire soutenir ce domaine de recherche émergent et pas une espèce d'hydre couvrant tout »[1609].

Alors que les sciences cognitives ne « s'intéressaient qu'à l'individu et au cerveau »[1610], les SSC ont développé, selon Laugier, des outils d'analyse des *Big Data* qui leur ont permis d'obtenir « des résultats que les sciences cognitives n'ont jamais eus »[1611]. À cela s'ajoute l'impact politique que, d'après elle, les méthodes des SSC peuvent avoir, notamment en termes de sciences participatives ou citoyennes et de démocratie participative :

« Ce pour quoi je compte beaucoup sur David [Chavalarias] et l'ISC c'est les sciences participatives, et tout ce qui est démocratie participative. C'est là que j'ai vu l'importance de cette science des systèmes complexes, c'est qu'elle nous permettait de travailler sur ces questions participatives »[1612].

[1606] *Ibid.*
[1607] *Ibid.*
[1608] *Ibid.*
[1609] *Ibid.*
[1610] *Ibid.*
[1611] *Ibid.*
[1612] *Ibid.*

Voici le dénouement de l'histoire synthétisé par Chavalarias :

> « [Sandra Laugier] a raconté ce qui se passait [à l'ISC] à son équipe, et puis le directeur, Patrice Bourdelais […] au bout d'un moment […] s'est convaincu que c'était un moyen de faire de l'interdisciplinarité intéressante en SHS, parce qu'on faisait à la fois beaucoup de SHS mais en plus on était très ouverts à biologie, physique, etc. »[1613].

Depuis sa transformation en UPS, l'ISC-PIF a multiplié les activités ouvertes aux citoyens et aux citoyennes et à la politique. Concernant le volet politique, l'institut a été l'un des collectifs ayant participé à la co-écriture de la Loi pour une République Numérique portée par la députée socialiste Axelle Lemaire sous le mandat du Président François Hollande[1614]. D'après Chavalarias, l'ISC-PIF a surtout milité pour un accès plus facile aux données, afin de simplifier le *data mining*[1615]. En ce qui concerne les sciences citoyennes, les initiatives de l'ISC-PIF sont diverses et variées :

> « À l'ISC-PIF, nous pensons qu'il est très important que les chercheurs dialoguent avec leurs pairs et le grand public pour une plus large diffusion et co-construction des connaissances liées à ces problématiques. C'est pourquoi nous multiplions les initiatives destinées au grand public : fête de la science, expositions, journées portes ouvertes etc. »[1616].

L'édifice qui héberge l'ISC-PIF, appelé le Totem, est conçu comme une « interface » pour encourager ces échanges entre scientifiques, artistes, citoyens et citoyennes[1617]. Un espace de 700 m^2 récemment rénové au rez-de-chaussée du bâtiment met ensemble l'institut, la Ville de Paris et une association d'artistes, Musaïques, dans l'organisation d'évènements culturels qui visent à mélanger art et science. En outre, l'ISC-PIF se propose de fournir plusieurs outils numériques en ligne aux journalistes et au grand public. Par exemple, dans une optique de « Big Data comme bien commun »[1618], lors des élections présidentielles de 2017 l'institut a lancé le Politoscope, qui se définit comme une « plateforme à la disposition des journalistes et des citoyens pour mieux contextualiser l'information issue des réseaux sociaux »[1619]. Chavalarias explique que cette plateforme vise à fournir un outil ouvert à tous et à toutes, à la différence des outils d'analyse d'opinion proposés par des compagnies privées, outils qui ne sont

[1613] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1614] Guiton, A., « Plus de 140 000 votes pour la consultation en ligne sur la 'République numérique' », *Libération*, 18 octobre 2015 : http://www.liberation.fr/futurs/2015/10/18/pres-de-140-000-votes-pour-la-consultation-en-ligne-sur-la-republique-numerique_1406724.
[1615] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1616] Page « Science & Society » du site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/science-society/.
[1617] Page « Le Totem » du site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/projects/le-totem/.
[1618] Page « Politoscope » du site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/projects/26269/.
[1619] *Ibid.*

« accessibles qu'à ceux qui peuvent se [les] permettre »[1620]. Le Politoscope exploite la théorie des réseaux, tout comme le fait l'autre plateforme similaire que l'ISC-PIF a lancée en 2015 lors de la COP21 de Paris sur le changement climatique, à savoir le Tweetoscope : « Analyzing the news of the Web since May 2015, the Tweetoscope aims to provide an evolving collective representation of questions and debates on this major societal issue »[1621]. Chavalarias reporte que cette dernière plateforme a été « repris[e] dans les écoles » et qu'en général elle est « utilisé[e] d'une manière intensive toutes les semaines »[1622].

L'UPS est décrite, par nos interviewés, comme la solution idéale pour le CNRS et pour l'ISC-PIF. Chavalarias explique avoir préféré cette option par rapport à celle de l'Unité Mixte de Recherche ou de l'Unité Mixte de Service, car ces deux dernières nécessitent de plus de temps pour être mises en place et possèdent des modes de fonctionnement plus rigides : faire entrer ou sortir des partenaires n'est pas bureaucratiquement aisé. À l'inverse, avec une UPS les partenaires peuvent entrer et sortir plus facilement[1623]. En même temps, une UPS peut embaucher et gérer ses fonds en autonomie. Comme le dit Chavalarias, ce type d'unité du CNRS est à la fois plus souple et plus solide que le GIS :

> « On a récrée l'esprit d'un GIS mais plus souple, déjà c'est des conventions bilatérales, donc les gens peuvent rentrer et sortir plus facilement, et plus solide, puisque ça s'appuie sur une unité qui est autonome […] ça permet aussi au CNRS d'affecter du personnel, par exemple l'administrateur systèmes ou une gestionnaire, de manière à avoir la pérennité dans le temps, parce qu'avec les CDD [qui sont obligés dans le cas du GIS] c'est juste infernal »[1624].

Une autre raison

> « est que l'équilibre de la communauté de l'ISC-PIF est basé sur un principe de non concurrence de l'ISC-PIF avec les labos partenaires. À partir du moment où tu deviens une UMR ou UMS, des chercheurs demandent leur affectation chez toi et

[1620] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[1621] Page officielle de la plateforme Tweetoscope : http://tweetoscope.iscpif.fr.
[1622] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[1623] L'UPS dépend à 100% de l'InSHS du CNRS mais peut signer des contrats bilatéraux de cinq ans avec d'autres structures (CNRS, ISC-PIF, « Contrat de partenariat », document modèle, 2014, archives de David Chavalarias). Aujourd'hui les partenaires de l'ISC-PIF sont dix-neuf : l'on compte des grands établissements (EHESS, ENS, ESPCI, EPHE, Mines Télécom, MNHN), des universités (Sorbonne, Diderot, Cergy, UPMC), des EPIC (CEA), des EPST (INRA, CNRS, INSERM, IRSTEA), des fondations (Institut Curie), des EPA (IGN) et des institutions politiques (Région Île-de-France, Mairie de Paris) : site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/science-society/. En échange d'une cotisation annuelle, les partenaires peuvent nommer les membres du comité de pilotage de l'ISC-PIF (sur proposition du directeur de l'unité) et avoir un accès prioritaire aux services de l'UPS (plateformes, cours, espaces) : CNRS, ISC-PIF, « Contrat de partenariat », document modèle, 2014, archives de David Chavalarias.
[1624] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

cela est perçu par les labos partenaires comme une concurrence pour les postes, ce qui risque de diminuer leur investissement »[1625].

Selon Chavalarias, l'UPS, à l'aune du GIS, permet à l'ISC-PIF de « continuer à créer un centre où ça tourne, qui brasse et qui permet aux gens de faire de l'interdisciplinarité »[1626], autrement dit un « carrefour dynamique, un incubateur »[1627]. D'après le directeur de cet institut, l'UPS n'est donc pas une solution de repli, mais un choix réfléchi, bien que ce choix ait été pris en peu de temps et sous de fortes contraintes. En particulier, avoir des plateformes mutualisées ou des grilles de calcul n'est pas la prérogative d'un laboratoire mais d'une fédération de laboratoires : « Si au CREA tu [voulais] une équipe d'ingénieurs qui développent un logiciel, tu [pouvais] pas l'avoir »[1628]. Cependant, si Bourgine et les autres membres du GIS avaient décliné ce dispositif de manières inhabituelles, Chavalarias aussi réinterprète la structure de l'UPS en modifiant certains aspects et en rajoutant des éléments :

« [On ne donne pas un] service au sens où on va vendre des analyses scientométriques et ça c'est notre service. Souvent les UPS c'est ça, une UPS autour d'un super-microscope et les gens viennent, ils payent l'UPS et utilisent le microscope. Nous c'est différent, le service qu'on fournit c'est en gros catalyser la recherche sur les systèmes complexes, développer des plateformes […] [et] c'est pas qu'on en a une et c'est celle-là. […] L'idée c'est pas de s'arrêter à une seule. C'est la raison pour laquelle l'hébergement de projets scientifiques et de plateformes est au cœur de notre mission […] et donc également d'avoir une orientation scientifique pour sélectionner les projets en résidence […] L'animation scientifique fait aussi partie intégrante de cette mission, donc avoir la salle de séminaires etc. »[1629].

La réinterprétation majeure nous semble être le fait de proposer des services à des publics différents – les partenaires académiques d'abord, mais aussi les entreprises, les journalistes, les artistes, aussi bien que les citoyens et les citoyennes en dehors de tout collectif organisé. En outre, ces services sont gratuits et *open source* : nous en reparlerons dans l'Aparté 2. Chavalarias conclut son discours sur l'UPS en synthétisant la structure qu'il dirige avec trois mots : « souple », « stable » et « neutre »[1630]. La neutralité est importante, d'après lui, pour ne pas être en concurrence avec les partenaires et pour ne pas se limiter à un seul type de public, d'usage ou de discipline : l'interdisciplinarité reste en effet le maître-mot.

[1625] Mail de David Chavalarias, 08.04.18.
[1626] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1627] *Ibid.*
[1628] *Ibid.*
[1629] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[1630] *Ibid.*

Le rôle de la Ville et de la Région dans la pérennisation

Nous avons examiné le rôle du CNRS dans la pérennisation de l'ISC-PIF. L'Île-de-France et la Ville de Paris ont joué un rôle important également. Chavalarias relate que depuis 2011 lui et Arnaud Banos – géographe du CNRS rattaché à Géographie-Cité et directeur de l'ISC-PIF de 2009 à 2011 – se sont activés pour chercher des locaux auprès de la Région et de la Ville, les loyers privés étant trop chers et les partenaires n'ayant pas proposé de locaux[1631]. Si la Région ne disposait pas de bâtiments intéressants pour l'ISC-PIF, Paris avait proposé une partie de l'espace disponible au Centre de Recherches Interdisciplinaires fondé par le biologiste François Taddei rue Debussy. Le CRI, en train de s'étendre depuis sa fondation, a refusé la cohabitation, au motif qu'il allait bientôt occuper entièrement ses locaux[1632]. La Direction du Territoire de la Mairie de Paris a alors proposé autre chose, en acceptant la proposition de l'ISC-PIF qui était de rénover les locaux grâce à un fonds du DIM qui était utilisable à cette fin :

> « [O]n avait 300.000 euros d'une convention DIM pour faire de la rénovation de locaux. Ou qu'on pouvait utiliser pour ça. Donc en fait, moi […] j'ai négocié avec la Ville de Paris, j'ai dit, 'On cherche et en plus on peut rénover si vous voulez mais on a besoin d'un endroit'. À la ville c'est compartimenté […] Notre interlocuteur c'était la branche recherche et ils nous ont dit, 'On a trouvé un bâtiment qui relève plutôt de la branche culture, mais ça fait plusieurs mois qu'ils en font rien, et le bâtiment est un peu délaissé'. Il y avait des gens mais il y avait des étages qui étaient vides »[1633].

Le Totem est un bâtiment construit en 1997 par l'architecte Christian de Portzamparc et situé 11 place Nationale dans le 13ème arrondissement de Paris. Il est « reconnaissable à ses deux cubes empilés, l'un accueillant des artistes, l'autre accueillant l'[ISC-PIF] »[1634]. Lorsque l'un des organismes louant une partie de l'édifice l'a quitté, deux étages, puis trois, ainsi que l'auditorium sont devenus disponibles pour l'institut dirigé par Chavalarias. Catherine Robert, chargée de la valorisation scientifique et de la mise en place des partenariats privés à l'ISC-PIF, explique pourquoi la Ville de Paris a décidé de supporter ce laboratoire. Les raisons ne s'éloignent pas de celles de l'InSHS illustrées par Laugier :

[1631] Chavalarias explique aussi que résider chez un des partenaires aurait limité la fonction de faiseur de « réseaux » : « En plus personnellement je trouvais que c'était pas très intéressant d'être dans un partenaire, parce qu'à partir du moment où t'es dans un partenaire tu fais plus ton truc de réseau » : entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

[1632] *Ibid.*

[1633] *Ibid.*

[1634] Page « Le Totem » du site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/projects/le-totem/.

> « Ce qui […] intéresse [la Ville de Paris] […] c'est qu'on a […] développé des expérimentations de sciences citoyennes […] La Ville de Paris finance la réhabilitation du rez-de-chaussée du bâtiment où il va y avoir un auditorium où on peut organiser des choses. Ils nous ont donné un grand financement pour qu'en retour l'on ouvre à la citoyenneté. [L'ISC-PIF] est inscrit dans l'arc de l'innovation, c'est une espèce de zone, c'est un territoire qui se dessine un peu en croissant, surtout le Nord et l'Est parisien, où la Ville de Paris essaye de développer des initiatives innovantes. C'est une manière de dynamiser des zones qui sont un peu déshéritées, de leur donner une nouvelle vie »[1635].

L'innovation sociale et les sciences citoyennes vont ensemble :

> « disons que [les sciences citoyennes] c'est appliquer les gens dans des projets, leur donner aussi plus de prise sur ce qu'est la science et la manière dont elle se construit. […] Il y a aussi une association, Musaïques, présidé par Cédric Villani, mais dont la cheville ouvrière est Patrice Moullet, qui a développé un truc qui s'appelle l'Omni. On fait de la musique avec ça de manière très particulière qui permet de développer l'usage de cet instrument pour les handicapés, les enfants, mélanger divers types de populations. L'idée c'est de développer des ponts »[1636].

Chavalarias s'est retrouvé en définitive à poursuivre la stratégie multi-échelles de Bourgine : sans l'apport financier du DIM dédié à la rénovation des locaux, sans l'aide de la Mairie de Paris dans le choix d'un local approprié et sans le soutien de l'InSHS du CNRS, l'ISC-PIF aurait disparu. Lors de son lancement sous forme de GIS, l'ISC-PIF comptait dix chercheurs, cinq post-doctorants, onze doctorants[1637] et environ 150 associés[1638] ; aujourd'hui l'UPS compte dix-sept membres du staff, six résidents, seize membres du comité scientifique et un membre honoraire[1639].

L'UNESCO

Reste à examiner une dernière échelle et un dernier dispositif investi par les entrepreneurs scientifiques français des SSC : le Campus Numérique des Systèmes Complexes (CS-DC l'acronyme anglais), supporté par l'UNESCO. Il s'agit d'un autre *tisseur de liens*, où les membres sont des individus et des institutions qui travaillent à la promotion et à l'enseignement de la science des systèmes complexes et des « sciences intégratives »[1640]. Face à « un monde de plus en plus interconnecté », le CS-

[1635] Entretien avec Catherine Robert, 14.03.17.
[1636] *Ibid.*
[1637] Site officiel de l'ISC-PIF : http://www.iscpif.fr/tiki-index.php?page=researchers-fr.
[1638] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
[1639] Site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/about/team/.
[1640] Présentation du Campus Numérique sur le site officiel du Complex Systems Digital Campus : http://www.cs-dc.org/cs-dc-about.html. Les fondateurs des SSC en France se pencheront souvent sur la problématique de créer

DC se propose d'offrir des « pratiques éducatives et scientifiques nouvelles »[1641] pour un « apprentissage ubiquitaire »[1642] et fournit « une éducation personnalisée au sein d'un cursus 'systèmes complexes' »[1643]. Il se pose aussi des objectifs d'utilité sociale importants :

> « Il s'agit aussi de participer aux impacts sociétaux du développement de cette science qui grâce à la meilleure appréhension de la complexité des phénomènes et des enjeux peut éclairer des grands enjeux mondiaux tels que le changement climatique, la globalisation, le partage équitable de l'enseignement (en produisant des modèles de diffusion dont peuvent se saisir tous les pays)… tout ceci rentre en résonance avec les grands objectifs de l'UNESCO ou encore du développement durable planétaire »[1644].

Ce dispositif n'est pas une chaire UNESCO**[1645]**, c'est en revanche l'un des 69 « réseaux UNITWIN » (abréviation de University Twinning and Networking Programme, dispositif crée en 1992)[1646]. Il est vrai que les chaires UNESCO sont souvent connectées à l'un ou à plusieurs de ces « réseaux », mais le « réseau » UNITWIN CS-DC n'a pas une chaire UNESCO rattachée. En général, les « réseaux » UNITWIN se veulent des « think tank » capables d'enrichir les cours universitaires des pays impliqués, dans une optique de collaboration des pays du Nord avec les pays du Sud, ou des pays du Sud entre eux[1647]. Le CS-DC UNITWIN est l'un des quatre « réseaux » de cette sorte créés par la France : il a été établi en 2014 et, comme les autres exemples de ce type[1648], il relie plus de 120 institutions autour du monde[1649]. Sur

---

des disciplines intégratives, à savoir des disciplines rassemblant des méthodes et des questions provenant de secteurs disciplinaires différents dans une seule, unique discipline monothématique et systémique : par exemple, une biologie intégrative intégrerait plusieurs sciences de la vie et des outils provenant d'autres disciplines, telles que les mathématiques, les physiques et l'informatique. Cette tendance est parallèle à celle menée au SFI par Geoffrey West et surtout David Krakauer.

[1641] Présentation du Campus Numérique sur le site officiel du Complex Systems Digital Campus : http://www.cs-dc.org/cs-dc-about.html.

[1642] CS-DC, « Le Campus Numérique des Systèmes Complexes. De la molécule à l'écosphère », plaquette de présentation, 2014, archives de Paul Bourgine.

[1643] *Ibid.*

[1644] Mail de Cyrille Bertelle, 29.03.18.

[1645] Dans le monde il y a plus de 760 chaires UNESCO, une de celles-ci traite d'une autre *tradition* des théories de la complexité : la chaire de la pensée complexe d'Edgar Morin.

[1646] Page officielle de l'UNESCO dédiée aux réseaux UNITWIN : http://www.unesco.org/en/university-twinning-and-networking/university-twinning-and-networking/.

[1647] *Ibid.*

[1648] Le site official de l'UNESCO sur les réseaux UNITWIN les présente ainsi : « Through this network, higher education and research institutions all over the globe pool their resources, both human and material, to address pressing challenges and contribute to the development of their societies. In many instances, the networks and chairs serve as thinktanks and bridgebuilders between academia, civil society, local communities, research and policy-making. They have proven useful in informing policy decisions, establishing new teaching initiatives, generating innovation through research and contributing to the enrichment of existing university programmes while promoting cultural diversity. In areas lacking expertise, chairs and networks have evolved into poles of excellence and innovation at regional or sub-regional levels. They also contribute to strengthening North-South-South cooperation » : https://en.unesco.org/unitwin-unesco-chairs-programme.

le site du CS-DC, qui reprend l'accord signé avec l'UNESCO[1650], on peut lire une présentation de ses missions : elles visent à soutenir la recherche sur les systèmes complexes et leur ingénierie, dans une optique de développement socioculturel et de soutenabilité environnementale, ainsi qu'à promouvoir une éducation (« training, information and documentation ») sur les SSC, qui soit ouverte à tous et à toutes, et qui soit personnalisée et à vie[1651]. Pour ce faire, le CS-DC se conçoit comme « une grande infrastructure d'intégration de modèles, fondée sur des plateformes distribuées d'observation multi-échelles des systèmes complexes »[1652] : plusieurs instruments sont conçus, notamment un portail CS-DC sur Wikiversity – où sont offerts plusieurs supports formatifs (MOOC, espaces de rencontre virtuels[1653], plateformes et logiciels mutualisés[1654], etc.) – et une « feuille de route vivante », ouverte à la participation de tout scientifique souhaitant la changer ou l'enrichir :

> « Les enseignants-chercheurs, les chercheurs de ces établissements peuvent faire partie de[s] e-laboratoires qui ont été mis en place par un processus bottom-up, c'est à dire à l'initiative de ces petits groupes de chercheurs réunis en collaboration international. L'objectif est de partager le développement de cette science émergente qui est celle des systèmes complexes (dans sa dimension interdisciplinaire), la promouvoir »[1655].

La base de données et d'outils en ligne se nourrit surtout à partir des institutions associées au « réseau », à savoir l'Université de Strasbourg et l'Université du Havre. Ces deux universités, représentées respectivement par les professeurs en informatique Pierre Collet et Cyrille Bertelle, coordonnent le dispositif international. Bourgine, « qui est d'ailleurs à l'origine de la construction du réseau », en est le président[1656]. L'UNESCO ne fournit pas de financement, se limitant à conférer le label : cette

---

[1649] « Les universités qui ont adhéré ont joint à leur adhésion des programmes, de projets de recherche et d'enseignement sur les systèmes complexes qui peuvent être mobilisés pour aider à une construction international collaborative […] Les représentants des membres du réseau (c'est à dire les établissements d'enseignement supérieur) participent au conseil mensuel du CS-DC en visio-conférence : on y définit la politique de développement du réseau et de ses challenges » : mail de Cyrille Bertelle, 29.03.18.

[1650] UNESCO & CS-DC, « Accord entre l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture et le Réseau 'Campus Numérique des Systèmes Complexes' concernant l'établissement d'un programme de coopération UNITWIN », 2014, archives de Cyrille Bertelle.

[1651] Présentation du Campus Numérique sur le site officiel du Complex Systems Digital Campus : http://www.cs-dc.org/cs-dc-about.html.

[1652] CS-DC, « Le Campus Numérique des Systèmes Complexes. De la molécule à l'écosphère », plaquette de présentation, 2014, archives de Paul Bourgine.

[1653] « Des organisations se font aujourd'hui via des e-laboratoires qui regroupent des petites équipes de recherche internationales sur des thèmes précisés dans les feuilles de route […] Le réseau réunit tous les premiers lundi après-midi de chaque mois les représentants de ses membres en visio-conférence » : mail de Cyrille Bertelle, 29.03.18.

[1654] « Des outils collaboratifs permettent le fonctionnement à distance des chercheurs de ces e-laboratoires » : *ibid.*

[1655] *Ibid.*

[1656] *Ibid.*

institution fournit le logo, mais dans le statut elle prend les distances de ces réseaux sur plusieurs points[1657]. Les deux sites liés au CS-DC sont pour l'instant construits par des étudiants de Collet et par Bourgine lui-même. Ce dernier nous a annoncé que le dispositif ira chercher du support économique « chez les grands sponsors », car « on reprend l'idée de 1995 »[1658]. L'accord du « réseau » dure six ans, mais peut être renouvelé, pourvu qu'il respecte quelques critères :

> « L'UNESCO peut décider de ne pas renouveler le présent Accord ou de supprimer le Programme de coopération si le Réseau ne soumet pas de rapport d'étape sur ses activités dans les temps, si l'évaluation des rapports est négative ou si les activités du Réseau ne correspondent pas aux priorités stratégiques de l'UNESCO »[1659].

Encadré 14. La plateforme OpenMOLE

Dans ce chapitre, nous avons manié des objets divers et variés : institutions, rhétoriques et arguments, stratégies politiques, archives. Nous n'avons pourtant jamais parlé des pratiques et des techniques que tous ceux et celles qui s'inscrivent dans les SSC mettent en place ou utilisent dans leur quotidien. Nous voulons partiellement remédier à ce manque ici – d'autant plus que cela fait l'objet d'autres chapitres –, en exposant quelques extraits de notre entretien avec Mathieu Leclaire sur OpenMOLE. Outre le fait de donner un peu de chair aux SSC, cet encadré vise à illustrer les difficultés du travail computationnel et interdisciplinaire, aussi bien que les résistances qu'il peut rencontrer.

Leclaire est l'un des ingénieurs de recherche affectés à l'ISC-PIF pour développer cette plateforme avec Romain Reuillon, qui l'a conçue[1660]. Parfaitement alignée avec les impératifs du CNRS sur l'importance des Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR)[1661], OpenMOLE est en développement depuis 2008, elle se

[1657] Par exemple : « le matériel d'information et promotion […] produit par le Réseau […] devra porter la mention suivante : '*Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des contenus de cette [publication] et des opinions qui y sont exprimées, lesquelles ne sont pas nécessairement conformes à celles de l'UNESCO et n'engagent pas l'Organisation*' » ; ou encore : « Ni le Réseau ni aucun des membres de son personnel employé pour l'exécution des activités relatives au Programme de coopération ne seront considérés comme des agents ou des représentants de l'UNESCO […] en outre, ils ne seront autorisés ni à se présenter comme faisant partie de l'UNESCO, ni à faire des déclarations au nom de l'UNESCO, ni à engager l'UNESCO dans des dépenses quelles qu'elles soient, ni à contracter en son nom quelque autre obligation que ce soit » : UNESCO & CS-DC, « Accord entre l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture et le Réseau 'Campus Numérique des Systèmes Complexes' concernant l'établissement d'un programme de coopération UNITWIN », 2014, archives de Cyrille Bertelle.

[1658] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.

[1659] UNESCO & CS-DC, « Accord entre l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture et le Réseau 'Campus Numérique des Systèmes Complexes' concernant l'établissement d'un programme de coopération UNITWIN », 2014, archives de Cyrille Bertelle.

[1660] Sur la division du travail avec Reuillon, Leclaire explique ceci : « Romain s'est beaucoup intéressé au cœur du soft. Donc moi j'ai fait des trucs en périphérie. Tu vois, la partie calcul distribué, c'est beaucoup lui qui l'a implémentée. Moi je l'ai aidé sur des parties du workflow, par exemple sur la partie topologique ou des choses comme ça, comment organiser ça, ou sur les grands concepts ou des choses comme ça. Et moi, effectivement, je me suis beaucoup intéressé à la représentation des choses, donc, sur un logiciel, ce qui est aussi le côté démocratisation, comment les gens vont pouvoir le prendre en main et comment ils vont pouvoir l'utiliser » : entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

[1661] Depuis au moins 2009, le CNRS parle de : « La notion de très grandes infrastructures de recherche (TGIR) englobe désormais les très grands équipements scientifiques – télescopes, antennes de détection, accélérateurs de particules, sources de neutrons et de rayonnement synchrotron, lasers de puissances et champs magnétiques intenses, bateaux satellites –, les centres de calcul intensif et des réseaux de plates-formes distribuées » : CNRS, « Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'Etat », 25 juin 2009, p. 100. « L'interprétation des données

veut comme un outil computationnel pour des expériences de simulation personnalisées ; elle est gratuite et *open source*[1662]. En exploitant le calcul parallèle, elle vise à explorer et diagnostiquer les modèles scientifiques des usagers qui peuvent être écrits dans de nombreux langages différents. La plateforme sert à calibrer les modèles, à explorer les espaces des paramètres[1663] et à les optimiser. Elle se base sur des grilles de calcul dont les scientifiques qui l'utilisent ne disposent pas sur leur ordinateur personnel ou dans leurs laboratoires. Il s'agit donc d'une plateforme à la fois technique et théorique : d'une part elle met à disposition une puissance de calcul importante, d'autre part, elle sert à tester et à explorer les modèles des chercheurs et des chercheuses.
Le premier extrait explique ce à quoi sert OpenMOLE d'un point de vue théorique et quel est le but de ses développeurs à long terme :

> « Après, ça dépend aussi à quel endroit tu en es dans la construction de ton modèle. En général quand on rencontre les gens, ils ont plutôt entendu parler de nous parce qu'ils savent qu'on va pouvoir faire du calcul parallèle. Et c'est plus parce qu'en général ils s'imaginent qu'ils ont terminé leurs modèles et ils veulent plutôt reproduire des scénarios. […] Alors qu'en fait, tu pourrais vraiment l'utiliser dès le début de manière itérative pour pouvoir calibrer ton modèle, te dire : arriver justement à savoir si tes paramètres ont de l'influence ou pas, arriver à savoir si ton modèle est robuste ou pas, arriver à connaître tout ça. […] Le truc c'est qu'en général, tu étais occupé vraiment par les mécanismes, par l'expertise et par comment tu injectes ta connaissance experte dans ton modèle. […] L'idée un peu à terme aussi d'OpenMOLE serait de pouvoir avoir un outil qui soit vraiment un compagnon. Tu es en train de le faire et ça ne te coûte quasiment rien, hop tu l'as compilé, pouf tu lances. C'est un gros check up pour moi. J'aimerais bien pouvoir arriver à faire ça, tu vois. […] un peu comme si tu compilais un modèle. Là tu fais un check up […] tu imagines si tu avais une puissance de calcul infinie, tu lances, et ça dit : 'Tiens, ce paramètre-là ne sert à rien du tout, il ne contribue pas du tout à expliquer ta dynamique'. Ou : 'Celui-là, il n'intervient que dans certaines zones de l'espace', ou : 'Celui-là dès que tu le fais varier un peu, tes solutions elles explosent' »[1664].

L'extrait suivant nous paraît intéressant car il reporte l'histoire des phases de développement de la plateforme. Cela à travers la description des obstacles matériels, sociaux et théoriques que les deux trentenaires informaticiens rencontrent chez les usagers et qu'ils utilisent pour mieux adapter les fonctionnalités de la plateforme à son public. Une note avant ce long passage : Leclaire y fait souvent référence à une séance de formation à l'usage d'OpenMOLE, où nous avons été des observateurs participants. Il se réfère en particulier à une chercheuse présente lors du cours et qui n'était pas une codeuse experte :

> « *Question* : Qu'est-ce que tu as… quels ont été tes fonctions depuis le début […] ?
> *Leclaire* : Moi, je me suis beaucoup intéressé à la partie utilisateur, et à la partie comment les gens s'en servaient […] Donc développer beaucoup de logiciels, faire une interface plus graphique pour qu'ils puissent interagir avec le logiciel. Et on s'est plantés sur plusieurs versions […] qui au final étaient des trucs où on pensait que les gens allaient… que ça allait être beaucoup plus simple pour eux alors qu'en fait ça ne l'était pas. Tu vois, par exemple, on dessinait des workflows[1665] graphiquement, et tout ça. On s'est dit : 'Ça,

---

issues de l'observation ou de dispositifs expérimentaux de plus en plus puissants et la modélisation de systèmes de plus en plus complexes devront être soutenus par un effort important en matière de simulations numériques faisant appel à des moyens 'lourds' de calcul centralisés (machines pétaflopiques) ou répartis ('grappes' et 'grilles') » : CNRS, « Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'Etat », 25 juin 2009, p. 104.

[1662] Site officiel de la plateforme OpenMOLE : https://www.openmole.org.

[1663] « [À] chaque fois ça s'est fait de manière successive, c'est-à-dire : ah, tiens, on arrive à produire notre scénario, ah, super. Est-ce qu'il n'y aura pas d'autres paramètres qui nous permettraient de reproduire le même scénario ? Ah ça on ne sait pas. Bon, si on refait par du SMA, ça va encore nous prendre beaucoup du temps. On va essayer de mettre au point une méthode qui va nous permettre de faire ça. […] On va essayer de construire une méthode qui va nous permettre que notre modèle génère de la diversité, qu'est-ce qu'il a dans le ventre notre modèle, qu'est-ce qu'il est capable de générer ? » : entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

[1664] *Ibid.*

[1665] Un workflow, traduit par flux de travaux ou par automatisation de processus, est le passage d'une étape à l'autre d'un ensemble de tâches effectuées par une ou plusieurs personnes dans un système opérationnel donné. Leclaire le définit ainsi : « Un workflow, c'est un enchainement de plusieurs tâches, où une tâche c'est quelque

ça va être hyper bien et tout', et en fait ça ne marchait pas parce que c'était beaucoup moins souple qu'un script bien pensé. Et donc voilà, il y a eu plusieurs versions, puis plusieurs essais technologiques aussi, qu'on ratait, tu vois ? Quand je suis arrivé, on bossait avec un gars qui était à Clermont aussi […] Nicolas Dumoulin. Et lui, il bossait beaucoup. Et donc on bossait en Java, à l'époque il bossait beaucoup avec Netbeans qui était… en gros c'était un *framework* dans lequel tu pouvais faire du développement, mais à la fin […] ton logiciel c'était un truc Netbeans que tu personnalisais […] et lui il développait beaucoup là-dedans, moi j'arrivais, je ne connaissais pas Java non plus. […] En fait, j'ai beaucoup suivi ses recommandations. Et lui, il aimait bien développer dans Netbeans. Donc je suis parti là-dedans. Il se trouve que c'était un énorme machin, un truc monolithique. Et au final, à un moment donné, on a tout dégagé, et on s'est orientés beaucoup plus vers des technowebs qui sont beaucoup plus des trucs de notre époque. Là où j'ai tout réappris, moi […] je ne faisais pas du web du tout […] beaucoup des gros problèmes de ces versions-là, c'est que le logiciel, le côté graphique était toujours en retard sur les composants du cœur d'OpenMOLE. Parce qu'il fallait toujours les implémenter graphiquement, et des fois un truc qui se fait très simplement avec une ligne de script est très difficile à représenter graphiquement. […] tu as vu notamment quand on a fait la promotion d'OpenMOLE, il y a des gens, tu leur montres trois lignes de script, ils hurlent. Alors qu'en fait, c'est souvent un bon levier d'expression quoi, tu vois ? Pour exprimer ce que tu veux, souvent écrire une phrase c'est plus facile qu'autrement, notamment que de faire des boîtes ou des choses comme ça. Voilà. Du coup, on a repensé après l'OpenMOLE. […] La version que tu vois aujourd'hui, c'est d'avoir des trucs qui sont graphiques, mais le script reste au cœur, c'est-à-dire qu'il y a des choses qui s'expriment beaucoup plus facilement avec un script. […] Alors que moi j'avais fait un truc graphique où tu pouvais représenter par des boîtes, tu partais de ta variable et tu présentais par une boîte la façon dont tu voulais explorer un intervalle, et puis quelle sous-partie de cet intervalle tu voulais prendre, et faire des combinaisons, parce qu'on n'a plus beaucoup de temps de faire ça. Ça marchait, mais au final on se rendait compte que tout le temps que j'avais passé à faire ça, on n'arrivait pas encore à faire tout ce qu'on devait pouvoir faire avec des trucs pour l'expérience, et que c'était finalement moins pratique que d'écrire un script, quoi.

Question : Mais moins pratique dans quel sens ? Parce que c'est comme si vous aviez le désir de toujours ouvrir la boîte noire pour 'démocratiser' en fait l'usage, et le rendre plus expressif comme vous dites, ou plus puissant je ne sais pas. Mais c'est au prix de perdre certains usagers quoi. […] [Vous] augmentez la 'démocratie', mais voilà, tu perds probablement sur le chemin certains usagers, alors que tu pourrais les gagner en simplifiant […]

Leclaire : Je pense qu'il y a deux choses. Il y a [un sens qui] voudrait dire pouvoir faire des choses de manière plus […] facile, plus rapide, mais pouvoir faire moins de choses. Alors que tu peux avoir un niveau d'expression qui est plus simple mais qui permet de faire les mêmes choses. C'est-à-dire que c'est comme si tu masquais une certaine complexité. C'est-à-dire que par exemple, là avec un script OpenMOLE, tu peux décrire des choses qui sont assez puissantes, mais où tu as caché beaucoup de techniques qu'on n'a pas besoin de retranscrire, réexpliciter à chaque fois. Donc c'est ça en fait, c'est-à-dire que tu simplifies la façon de le décrire mais tu ne simplifies pas l'objectif. […] [Les b]outons, c'est binaire, ça fait on/off […] il y a eu des moments assez frustrants où je passais du temps à développer cette interface et où je me rendais compte qu'une certaine personne l'utilisait, une personne comme [Anonymisée], comme tu as vu l'autre fois, qui hurle dès qu'elle voit deux lignes de script… Donc ces gens-là s'en servaient. Mais ils ne pouvaient pas faire tout. C'est-à-dire qu'à un moment donné, ils avaient choisi […] alors ça vous ne pouvez pas le faire avec l'interface graphique parce que forcément, pour représenter graphiquement les choses, tu es toujours en retard sur ce qui est fait dans le cœur avec des fonctions, avec du code. Donc il y avait ce côté un peu frustrant, et l'autre côté frustrant, c'était de voir que les gens qui connaissaient bien, l'autre côté du panel, les gens qui savaient bien décrire leurs expériences, eux ils faisaient du script parce que ça allait beaucoup plus vite de l'écrire en script que de le décrire graphiquement. Donc si tu veux, il y a une double frustration à la fois. Les gens que je pouvais contenter parce qu'ils n'avaient pas envie d'écrire de script, je les contentais à un certain niveau […] et puis les autres… donc si tu veux, pour moi c'est hyper-frustrant. Là aujourd'hui, ce qui me satisfait beaucoup, c'est : ce que je développe, tout le monde s'en sert. [De] Romain,

---

chose qui exécute du code, et où entre différentes tâches peuvent circuler des variables. Les sorties d'une première tâche peuvent être l'entrée d'une suivante » : *ibid.*

qui est la personne la plus experte du script OpenMOLE, jusqu'à presque [Anonymisée] quoi. […] Et ça, moi j'ai besoin que l'outil soit universel dans ce sens-là, c'est-à-dire qu'il soit adopté par tous ceux qui ont – évidemment […] l'objectif ce n'est pas que ma grand-mère puisse s'en servir – mais que tous les gens qui sont capables d'écrire… Nous c'est un peu ça qu'on s'est dit : 'Il faut que des gens qui soient capables d'écrire plusieurs lignes pour faire un modèle soient capables d'utiliser OpenMOLE'. Et quand tu es capable d'écrire plusieurs dizaines de lignes pour écrire un modèle, dans un langage donné, tu peux écrire quelques lignes de script OpenMOLE. Et donc du coup maintenant, ce vers quoi on va, c'est de la génération de script. Donc tu as vu, tu prends ton modèle, ça te génère du script et au fur et à mesure on va masquer encore cette complexité-là, mais sauf qu'on ne va plus s'intéresser au *workflow*. Parce qu'avant tu pouvais dessiner des *workflow*s graphiquement, faire des boîtes qui étaient des tâches, des transitions, etc. Au final, c'est une complexité qu'on peut masquer aussi […] [Les usagers] ont un modèle, ils ont une question scientifique et ils ont des problèmes [de puissance computationnelle] parce que se poser ces questions-là, ça met beaucoup de temps à s'exécuter sur leurs machines. C'est ça leurs trois problématiques »[1666].

Conclusion

À lire certains auteurs – par exemple les historiens Sam Schweber et Matthias Wächter, le journaliste Mitchell Waldrop ou le sociologue John Urry –, les SSC seraient en train d'envahir tout domaine du savoir ou auraient déjà déterminé un changement de paradigme global. Dans leurs récits, le SFI est l'épitomé de la nouvelle manière de produire de la connaissance, il assume à leurs yeux la même importance qu'un CERN pour la physique théorique. Si, d'une part, il y a certainement une surévaluation de ce domaine de la part de ces auteurs (et de bien d'autres), d'autre part, il y a aussi une confusion terminologique, car souvent le simple usage de la simulation numérique dans n'importe quelle discipline des sciences naturelles, humaines et de l'ingénieur suffit, pour eux, à le classer dans les sciences de la complexité. De ce fait, toutes les sciences computationnelles peuvent être vues comme des « sciences de la complexité ». Toutefois notre approche a été plus pragmatiste et rigoureuse : nous nous sommes concentré sur les actions des groupes sociaux se revendiquant de l'étude des systèmes complexes, et nous avons retracé leurs efforts stratégiques pour fonder ce domaine dont ils possèdent une vision restreinte et détaillée. Faire cela, croyons-nous, a suffi pour déconstruire toute lecture historique réductionniste ou simplificatrice des SSC. Souvent en effet, ces auteurs qui voient la complexité partout sont les mêmes qui expliquent l'hégémonie computationnelle d'aujourd'hui en raison de la simple diffusion de la puissance de calcul dans les milieux technoscientifiques. Le présent chapitre, tout comme les précédents, montre en revanche que les sciences de la complexité et le travail interdisciplinaire et computationnel ne vont pas de soi, qu'ils rencontrent de nombreuses difficultés et surtout qu'ils ne sont pas irréversibles, même lorsque leurs soutiens réussissent à forger des institutions pérennes. En effet, si pour l'instant les SSC possèdent un espace en région parisienne qui ne semble pas craindre une suppression imminente, en France

[1666] *Ibid.*

et en Europe elles pâtissent d'un faible ancrage institutionnel. Les autres instituts de la complexité de France et du continent sont rares, petits et méconnus, ce qui soumet le domaine de recherche qu'ils concrétisent à un risque de disparition.

Dans ce chapitre nous avons fait le tour de la stratégie multi-échelle menée d'abord par Bourgine (et ses alliés), puis par Chavalarias (et ses alliés) dans des conditions ressemblant plus à une nécessité de survie que d'expansion. Nous avons vu que les échelles s'entremêlent : nous ne savons pas si et combien chaque niveau « pressait » sur son voisin, comme Bourgine l'avait théorisé, mais nous savons par exemple que l'ISC-PIF a pu se pérenniser grâce à la collaboration entre trois entités différentes : la Ville de Paris, la Région Île-de-France et le CNRS. L'institut a pu donc faire l'économie du support européen, qui a d'ailleurs disparu entretemps, et il n'a pas pu tirer aucun profit du CS-DC, qui est une initiative expansive à large échelle, dépourvue de fonds et également susceptible de disparaître à tout moment. En outre, et c'est une troisième remarque, l'absence du support de la Commission Européenne et du RNSC ces dernières années a fortement affaibli non seulement l'expansion des SSC, mais leur propre existence socio-épistémique en France et en Europe. Sans les projets européens, certains des « réseaux » s'inscrivant dans ce domaine cessent d'exister ou de travailler ensemble. Si les collaborations continuent sous d'autres formes, elles ne le font pas toujours sous l'étiquette officielle rendue célèbre par le SFI. Ces communautés, en outre, se réunissent de moins en moins au nom des systèmes complexes dans des conférences ou dans des journaux scientifiques. Pour ne prendre qu'un exemple, les épidémiologistes computationnels – des anciens physiciens statisticiens ayant participé au lancement des SSC – n'utilisent que rarement le mot clés de « systèmes complexes » dans leurs publications scientifiques. Ils ne vont plus trop aux conférences l'affichant et préfèrent plutôt se rendre à celles dédiées à l'épidémiologie, à la physique statistique ou à la théorie des réseaux. Cette dernière est désormais perçue comme une spécialité faisant partie de plein droit de la physique statistique, tandis que les SSC ne sont en général pas vues comme une discipline ou un domaine jouissant de la légitimité qui provient de la reconnaissance de la communauté scientifique au sens large.

Une remarque enfin concernant le rôle de l'InSHS dans la pérennisation de l'ISC-PIF. Malgré le fait que les feuilles de route des SSC franco-européennes, tout comme les discours des fondateurs du SFI, aient promis de toucher à tous les domaines essentiels des sociétés contemporaines – écosystèmes, climat, médecine, télécommunications, finance, etc. –, force est de constater que les scientifiques se réclamant de l'étude des systèmes complexes finissent souvent par apporter une contribution quantitative aux SHS plus qu'à d'autres domaines. Bien que Chavalarias tienne à préciser que les thématiques de l'ISC-PIF oscillent depuis le début entre plusieurs disciplines et qu'elles oscilleront encore dans le futur, les invariants étant l'interdisciplinarité et les communs scientifiques, nous ne pouvons que remarquer que les SHS sont devenues le

centre d'intérêt principal de l'institut parisien. Les humanités numériques ont représenté l'une des activités principales du SFI également et, comme on l'a vu, elles ont représenté le facteur de stabilisation de l'ISC-PIF. Même si nous avons parlé de contingence pour décrire l'intervention de l'InSHS dans la transformation de ce centre de recherche en UPS, nous ne croyons pas qu'il s'agisse d'un hasard si on élargit l'espace du regard : les SHS étant considérées comme peu scientifiques, elles sont apparues comme un domaine où il était à la fois plus urgent et facile, du point de vue des scientifiques de la complexité, d'intervenir et d'offrir une contribution avec les nouvelles méthodes computationnelles. Dans le premier chapitre de cet Acte 1 nous avons vu également que ceci faisait clairement partie du projet épistémique des fondateurs du SFI dès le début. Ce point mérite une discussion critique, que nous menons dans le chapitre 14 à propos des dangers de l'hégémonie de la métaphysique computationnelle. En conclusion de ce premier Acte, dans l'Aparté 2 nous nous demanderons, en miroir avec le premier Aparté, comment comprendre l'entreprise de fondation des SSC en France et en Europe de la part de Bourgine et de ses alliés. Cela sera l'occasion pour qualifier le projet politique des SSC franco-européennes.

Aparté 2 – Chapitre 7 – À propos du projet politique des SSC franco-européennes

Pour comprendre la fondation du domaine des SSC en France et en Europe, il nous faut cerner les objectifs poursuivis par les entrepreneurs scientifiques qui ont lancé dans le continent le champ fondé par le SFI. Avaient-ils un projet politique ?
Dans l'Aparté 1, nous avons soutenu la thèse selon laquelle les fondateurs du SFI, face à la montée du néolibéralisme reaganien, au début des années 1980, inventent un nouveau domaine de savoirs et fondent un nouvel institut, dans le but de mettre au point une *mathesis universalis* censée pouvoir résoudre tous les problèmes majeurs des États-Unis, voire de l'humanité tout entière. Nous avons vu également que le SFI, du fait de la science éminemment théorique qu'il revendique, s'articule et s'insère de manière originale dans le *régime de production des connaissances* dominant. Sans vendre officiellement du conseil aux entreprises et en refusant de développer pour leur compte des « applications » industrielles concrètes, les scientifiques de l'institut américain se tournent vers le monde privé dans le but de se financer et de garantir leur « indépendance », tout en restant à l'écoute des besoins et des questions de leurs donateurs. C'est pourquoi nous avons parlé de *coïncidence idéologique* plus que de *convergence asymétrique*.
Quelle est la situation en France et en Europe ? Si les projets européens lancés par Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas ont souvent donné des « applications » industrielles à partir de recherches « fondamentales », l'ISC-PIF, le RNSC, ainsi que le CS-DC se fondent sur une logique de l'*open source* et de la mutualisation des ressources informatiques. Il n'y a pas, chez les entrepreneurs scientifiques franco-européens, de refus du monde privé, mais la logique proche des communautés *hackers* et *cyberpunk* domine et l'on observe un refus de la hiérarchie et de tout contrôle centralisé. Si le SFI est idéologiquement en phase avec le *régime de production des connaissances* dominant depuis les années 1980, et si les financements européens imposent aux scientifiques des objectifs de production au service d'une Europe plus compétitive, les sciences de la complexité européennes semblent sortir des cadres habituellement utilisés par les sociologues et les historiens des sciences pour appréhender les domaines technoscientifiques émergents.

Au niveau européen, business as usual

Avec le mathématicien anglais Jeffrey Johnson, Bourgine a écrit en 2006 une feuille de route européenne, dans laquelle les SSC étaient dépeintes comme la solution aux problèmes les plus importants de l'humanité :

> « The new science of complex systems will be at the heart of the future of the Worldwide Knowledge Society. […] It is part of every discipline. […] It will benefit industry, the public sector, and all social actors. Complex systems science will be the foundation of Europe's wealth and influence in the 21st century. […] Complex systems science is *computer enabled* and ICT will be part of *all* the research programmes of FP7. […] Complex Systems Science will be part of the foundations of Europe's wealth and influence throughout the 21st century »[1667].

Les « grands défis » cités comme des exemples d'« application » de ce domaine sont la médecine personnalisée et le monitoring de l'état écologique de la Planète :

> « *Personalized Health is one characteristic example of this kind of long term Grand Challenge*. Another, which is just as rapidly appearing on the horizon alongside personalized health, is the integrated monitoring and assessment of the state of our Earth System »[1668].

Ce régime de promesse est bien connu de la sociologie des technosciences émergentes[1669]. La rhétorique des entrepreneurs scientifiques, ici Bourgine et Johnson, doit s'adapter aux finalités de la Commission Européenne. Nous avons vu que pour Ralph Dum il s'agit de mettre les SSC au travail : « instead of playing with artificial life, instead of philosophizing about cybernetics, what real issues you can address ? What we have been pushing here is complex systems as a methodology to get things done »[1670]. Les premiers projets concernant l'Internet, conçu comme un système complexe, ont donné des « applications » sur l'Internet des objets (*Internet of Things*). Dum a illustré la structure des programmes de la Commission Européenne, en distinguant les recherches « *upstream* » plus théoriques et libres d'innover (« *blue sky* »), des recherches « *downstream* » plus ciblées et contraintes par des objectifs de production. Dum considère en outre que les premières recherches dans les domaines des SSC ont été un succès au vu de leurs « applications », désormais banalisées :

> « In IT there are different subprograms, most of them are very applied. So you really want to create the next technology. One of them is called FET […] which is a bit more upstream, a bit more blue sky. […] Regarding the *parcours* of complex systems, it started in FET and the Internet part went to the downstream part, where

[1667] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, *op. cit.*, p. 2.
[1668] *Ibid.*, p. 6.
[1669] Borup, M., Brown, N., Konrad, K., & Van Lente, H., « The sociology of expectations in science and technology », *Technology Analysis & Strategic Management*, 2006, vol 18, n. 3-4, pp. 285-298 ; Selin, C., « Expectations and the Emergence of Nanotechnology », *Science, Technology, & Human Values*, 2007, vol. 32, n. 2, pp. 196-220 ; Chateauraynaud, F., *Nanosciences et Technoprophéties*, Paris, Document de travail GSPR-EHESS, 2005.
[1670] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.

complex systems are very standard. Ten years ago complex systems were considered rather exotic, now everybody understands that networks are not Markovian, but follow the power law. This program was successful »[1671].

Un projet sur la vie artificielle dans la lignée de *SWARM* a débouché sur des réalisations robotiques, tandis qu'un projet visant à synthétiser une cellule de manière computationnelle, puis biologique, a échoué formellement, mais a tout de même eu des « applications *downstream* » en chimie combinatoire et en pharmaceutique, avec le développement de microtubes utilisés dans la microfluidique[1672]. Depuis 2013, Dum s'exerce à promouvoir la Global System Science (GSS), qu'il voit comme une continuation des SSC sous un autre nom et avec d'autres finalités. La GSS s'adresse aux décideurs politiques plus qu'aux entreprises. Dans le plan d'action de 2013 que Dum nous a adressé, il n'est pas question de systèmes complexes mais de « société globale » vue comme un système de systèmes :

« Public policy making in addressing challenges, like climate change, financial crisis, governance of pandemics, or energy sufficiency suffers from an intrinsic difficulty : impact and unintended consequences of public action are increasingly hard to anticipate. Such challenges are 'global' – are shared worldwide and tightly connect policies across different sectors. Facing such highly interconnected challenges, 'system of systems', societies tend to address subsystems and so fail to achieve systemic change »[1673].

La continuité entre la GSS et les SSC est à la fois méthodologique (mêmes outils computationnels) et sociologique (certains membres du SFI ou certains des entrepreneurs scientifiques des SSC européennes s'y retrouvent)[1674]. Il s'agit maintenant d'appliquer les vieux outils (MBA, réseaux) et les nouveaux outils (algorithmes appliqués aux *Big Data*) à toutes les sphères pertinentes pour aborder les « défis globaux » :

« The vision of GSS – is to provide scientific evidence in support of policies addressing global challenges. The ICT engines behind are large-scale computing platforms to simulate highly interconnected systems, to make full use of the abundance of data on social, economic, financial, technological, and ecological systems available today. Equally important are online social media/collaborative

[1671] *Ibid.*
[1672] *Ibid.*
[1673] Dum, R., « Towards an orientation paper : An action plan », January 2013, archives de Ralph Dum.
[1674] Jaeger, C.C., Jansson, P., van der Leeuw, S., Resch, M., Tàbara, J.D., & Dum, R., « Global Systems Science. Orientation paper », 2013, p. 2, archives de Ralph Dum.

ICT platforms that allow stakeholders to actively participate in the process of gathering and analysing (scientific) evidence and thereby in the policy process »[1675].

À l'École Polytechnique Fédérale de Zürich, qui est une des institutions enrôlées par Dum, il existe déjà des cours sur la GSS, fortement ancrés dans les recherches du SFI et de Dirk Helbing[1676], l'un des rares représentants des SSC en Allemagne, et l'un des plus actifs. Toutefois la GSS est avant tout soutenue par des programmes européens. Comme l'indique le site du réseau financé par FP7, appelé Global Systems Dynamics and Policy, la GSS est présenté comme une nouvelle science capable d'aborder, dans une optique de soutenabilité économique, politique et environnementale, les problèmes du monde contemporain, décrit comme hautement interconnecté, et considérés comme ingérables par un seul État-Nation[1677].
La logique de la Commission ne se distingue pas foncièrement de celle décrite pour d'autres domaines des technosciences dans le contexte du *régime de production de connaissances* dominant aujourd'hui. Mais si on quitte l'échelle européenne en revenant vers la France, nous nous apercevons que le projet politique des SSC hexagonales s'inscrit mal dans l'*économie des promesses* classique. À la fin de l'essai qu'il a consacré à ce thème, Pierre-Benoît Joly mentionne l'*open source* qu'il décrit comme un modèle d'innovation différent. Il s'agit précisément de sortir du cadre désigné par Joly sous la formule de *régime de l'économie des promesses technoscientifiques* (ETP l'acronyme anglais) :

« There are innovation approaches and models which do not fit the ETP regime. The case of OSS (Open Source Software) – and, more broadly, development of open-access tools in information technologies – shows that the distributed model of innovation can be more user-centred and that one of the motives of its promoters is to redistribute agency, knowledge and power. In other words, there is a normative model of society being performed as well »[1678].

De par sa dimension normative – en opposition à la mouvance dominante liée à l'ETP classique, qui fonctionne par des rhétoriques prométhéennes et une logique de l'urgence, le tout sur fond de gestes métaphysiques de naturalisation et de déterminisme technologique – l'approche de l'*open source* apparaît à Joly comme un régime alternatif. Le mouvement du logiciel libre n'est pas le seul régime alternatif, pouvant inclure, selon Joly[1679], des formes et dispositifs divers comme les associations

[1675] Dum, R., « Towards an orientation paper : An action plan », January 2013, archives de Ralph Dum.
[1676] Page d'un cours sur la GSS sur le site officiel de l'École Polytechnique Fédérale de Zürich : http://www.coss.ethz.ch/education/complexity.html.
[1677] Page de présentation de la GSS sur le site du réseau Global System Dynamics and Policy : http://www.gsdp.eu/about/global-systems-science/.
[1678] Joly, P.-B., « On the economics of techno-scientific promises », *op. cit.*, p. 215.
[1679] *Ibid.*, p. 216.

de patients qui produisent des savoirs complémentaires pertinents pour la recherche académique[1680] ou bien les expériences de recherche participative dans la sélection végétale[1681]. Essayons donc de caractériser le régime alternatif dans lequel s'inscrivent le RNSC et l'ISC-PIF en France.

Un parfum de gauche technocrate et libérale ?

Dans sa jeunesse, Bourgine a fait partie de la Quatrième Internationale « mais sur les positions de [Cornelius] Castoriadis » ; aujourd'hui il milite pour des outils informatiques qu'il décrit comme capables de faciliter l'accès à la connaissance dans les Sud, tels que les MOOC, et pour des plateformes numériques supposées faciliter des expériences de démocratie participative, comme les *civic tech*[1682]. Dans le contexte du lancement des SSC en France, il a mis l'accent surtout sur l'*open source* et sur la mutualisation des ressources.
La convention constitutive du GIS RNSC contenait déjà toute une philosophie du code source ouvert et mutualiste. Afin d'abattre les barrières institutionnelles et géographiques séparant les membres du GIS, le portail interactif du RNSC se posait comme « le lieu privilégié où tout membre de la communauté peut obtenir non seulement l'accès à tous les *contenus libres* […] mais aussi à *tous les outils pour créer ces contenus libres* »[1683]. Cela afin de créer « *de nouveaux moyens de travail collaboratif* »[1684]. Même s'il n'est pas le seul, Bourgine est l'un des porteurs les plus convaincus d'une telle stratégie d'ouverture, comme l'explique Chavalarias :

> « C'est vraiment un état d'esprit qu'a impulsé Paul [Bourgine]. Après il a agrégé des gens qui étaient dans le même état d'esprit. Moi je sais pas si c'est lui qui me l'a inculqué ou si je l'avais déjà avant, mais c'est pas très important si tu veux. C'est vraiment l'idée de science ouverte et d'*open data*, on mutualise, on fait des trucs qui sont pré-concurrentiels ou hors concurrence entre labos, parce que quand même la recherche est assez compétitive […] [Nos structures] sont des structures complémentaires aux labos traditionnels »[1685].

[1680] Epstein, S., « The Construction of Lay Expertise. AIDS Activism and the Forging of Credibility the Reform of Clinical Trials », *Science, Technology, & Human Values*, 1995, vol. 20, n. 4, pp. 408-437.
[1681] Demeulenaere É., Rivière, P., Hyacinthe, A., Balthassat, R., Baltazar, S., Gascuel, J.-S., Lacanette, J., Montaz, H., Pin, S., Ranke, O., Serpolay-Besson, E., Thomas, M., Van Frank, G., Vindras-Fouillet, C., Vanoverschelde, M. & Goldringer, I., « La sélection participative à l'épreuve du changement d'échelle. Trajectoire d'une collaboration entre paysans sélectionneurs et généticiens de terrain », *Natures Sciences Sociétés*, 2017, vol. 25, n. 4, pp. 336-346.
[1682] Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
[1683] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 13.
[1684] *Ibid.*
[1685] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

Pour Chavalarias, tous les participants au projet de l'ISC-PIF le font par passion[1686]. En effet, il compare l'UPS qu'il dirige à l'IXXI de Lyon et considère que la première se distingue du second par sa mission mutualiste, placée sous le signe de la philosophie des biens communs (thématique que Chavalarias a traité dans sa thèse de doctorat) :

> « Ici on milite beaucoup pour l'*open source* […] parce que c'est vraiment dans l'ADN de toute cette entreprise [que] de créer des ressources pour le collectif. Si tu raisonnes strictement en termes de carrière personnelle […] tu ne te mets pas dans un truc comme ça. Mais si tu te dis, 'Qu'est-ce que j'aimerais laisser aux gens, pour qu'après ils puissent faire des recherches interdisciplinaires correctement ?', [alors] il faut faire ça : c'est un choix. C'est pour ça que l'IXXI n'a pas de plateforme. IXXI est moins dans la démarche de produire un truc collectif, c'est plutôt, 'On fait un labo'. Après ils font un peu d'appels à projets, c'est vraiment le moule, 'On va faire de la recherche'. Nous évidemment on fait de la recherche, mais tout le monde croit vraiment à la mission de créer du bien commun »[1687].

Pour cerner la philosophie de Bourgine, l'informaticien et ingénieur de recherche de Clermont-Ferrand, Romain Reuillon, reporte une anecdote :

> « Paul [Bourgine] en public je l'ai vu s'énerver une fois et c'était à un conseil d'administration pour des gens qui disaient, 'Si je paie ça, qu'est-ce que j'ai de plus que ça et si je paie plus que ça, combien j'ai de mieux que lui ?'. Et lui il râlait en disant, 'Ça c'est la tragédie des communs ce que vous faites' »[1688].

Cependant Bourgine et Chavalarias ne sont pas les seuls porteurs d'une telle vision, ni forcément les plus fervents. Reuillon nous a fait part de ses convictions en matière de logiciel libre et non-payant, et de ses efforts pour les pousser et les diffuser parmi ses collègues. Chavalarias reconnaît ce caractère militant à Reuillon : « Romain lui est à fond *open software*, presque radical […] [À l'ISC-PIF] on n'est pas tous si radicaux que lui mais par son action il nous sensibilise vraiment »[1689]. L'actuel directeur de l'ISC-PIF explique qu'il y a « tout un spectre de gens qui utilisent les différents outils »[1690], certains optant pour des logiciels non-libres et/ou payants ; il dit aussi ne rien imposer à personne, parce que parfois « ils n'ont pas le choix […] pour ce dont ils ont besoin »[1691]. Pourtant la philosophie *open source* se répand de plus en plus : « ce

[1686] « [S]i tu viens dans ce créneau-là ici, alors que tu peux gagner dix fois plus dans le privé, c'est qu'en fait […] t'es vraiment passionnée par ce que tu fais » : *ibid.*
[1687] *Ibid.*
[1688] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1689] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1690] *Ibid.*
[1691] *Ibid.*

qui est intéressant c'est que, comme les gens discutent beaucoup, […] [e]n fait petit à petit chacun s'approprie la culture de l'autre »[1692]. Reuillon est conscient de son rôle militant et de son influence : « Moi j'essaie d'impulser beaucoup de choses, je suis très revendicateur ici, très militant, dans cet esprit-là. Je pense avoir instauré un peu la culture du logiciel libre ici, ce qui n'était pas le cas avant »[1693].
Le chercheur est arrivé à l'ISC-PIF en 2008 comme postdoctorant sur conseil de Guillaume Deffuant, directeur du LISC à Clermont-Ferrand. Reuillon a été attiré par la grille de calcul que le GIS venait d'acheter[1694]. Selon lui, Bourgine l'avait acquise sans savoir pour quoi précisément et cela avait eu des avantages indirects :

> « *Question* : Pourquoi acheter un truc dont ils ne vont pas se servir ?
> *Reuillon* : Parce que Paul [Bourgine] est assez visionnaire, enthousiaste. Déjà c'est une bonne stratégie pour avoir des sous et des gens comme moi. Il m'aurait pas attiré s'il n'avait pas fait ça. Il voulait mutualiser des ressources et il savait que la grille était le moyen pour mutualiser des ressources informatiques. Ça a été un bon pari »[1695].

Chavalarias ajoute que Bourgine avait acheté la grille dans l'optique de développer un logiciel comme OpenMOLE par la suite : « Quand j'ai rencontré Romain au LISC […] j'ai su que c'était la bonne personne pour ce projet. C'est sûr qu'au début, le logiciel n'existant pas, [la grille] a été sous-utilisée »[1696]. Dans sa thèse de doctorat, l'informaticien clermontois avait déjà travaillé sur le problème du calcul parallèle[1697], en essayant de construire un logiciel pour pouvoir traiter de nombreux processus en parallèle. Il voit ses expériences de programmation menées durant sa thèse comme des précurseurs de sa plateforme OpenMOLE. Maintenant celle-ci est co-développée avec Mathieu Leclaire, ingénieur issu de l'Institut National des Sciences Appliquées, et avec d'autres membres de l'UPS, et il s'agit d'une des ressources mutualisées les plus publicisées de l'ISC-PIF.
Pour Reuillon, la philosophie du logiciel libre devient avantageuse aussi pour les institutions, grâce notamment aux réductions de budget qu'elle rend possible. Autrement dit, le support institutionnel aux SSC arrive du fait d'un *malentendu gagnant-gagnant* ; et bien sûr aussi par un *travail de démarcation*, puisque les

[1692] *Ibid.*
[1693] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1694] *Ibid.*
[1695] *Ibid.*
[1696] Mail de David Chavalarias, 08.04.18.
[1697] Mathieu Leclaire illustre le calcul parallèle ainsi : « C'est pouvoir lancer séquentiellement, c'est-à-dire tu fais ton plan d'expérience, tu dis : je veux lancer 10 expériences avec mon paramètre, i=1 à i=10. Tu le lances une fois sur un processeur, il a fini avec i=1, ensuite hop, il va faire i=2, i=3, i=4. […] si ça prend n le temps pour calculer une, ça va durer 10n de temps. Si tu as 10 processeurs et tu sais le paralléliser, tu lances sur ton premier processeur avec i=1, puis sur le deuxième avec i=2, machins, i=10, ils vont se faire tous ensembles. Du coup ça va durer n, ton temps. Et pas 10n. Tu vas aller 10 fois plus vite » : entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

entrepreneurs scientifiques de ce domaine ont conscience de ce malentendu et l'utilisent pour leurs objectifs stratégiques :

> « [L]'argumentaire c'est si on engage un ingénieur en fait il vaut trois ou quatre, parce qu'il fait des plates-formes mutualisées. La mutualisation qu'on a défendu dès le départ, moi je la défendais pas vraiment comme une efficacité budgétaire mais plutôt comme du commun, le fait de pouvoir avoir quelque chose ensemble […] [Mais] c'est vendable auprès des décideurs en disant, 'Regardez, on fait du logiciel libre mais […] ça peut être répliqué dans tous les labos' »[1698].

Lors de ses études de licence, Reuillon était tombé, dit-il, sur « des profs géniaux qui étaient des libristes, des profs du logiciel libre de la première heure. Ils nous ont poussés à inventer plein de choses »[1699]. Quand il est enfin en thèse, son engagement *open source* devient officiel : « Je vais voir mon directeur de thèse prêt à lutter pour faire du logiciel libre. Je ne sais plus pourquoi j'avais cet *a priori* en tête. Il me dit, 'Pas de problème' »[1700]. C'est la même philosophie « libriste », mais aussi décentralisée, qu'il amène à l'ISC-PIF. Interrogé sur la première période dans son institution de rattachement, Reuillon se souvient avec nostalgie de la liberté administrative, organisationnelle et architecturale du premier siège de l'institut fondé par Bourgine, rue Lhomond : dans ses souvenirs, il n'y avait pas de lieux interdits, pas de contraintes d'horaires, pas de barrières. Selon lui, « [ç]a hérite de cette culture-là […] un peu informatique *hack* »[1701]. Reuillon nous a d'ailleurs mis à part de sa réflexion éthique : « J'ai pas lu grand-chose en philo mais j'essaie de fonder une morale sur la relativité, d'essayer de trouver comment faire émerger une éthique individuelle, une manière d'agir […] qui ne part pas d'un ordre divin, [et qui soit] *bottom-up* »[1702]. Puisque selon lui pour pouvoir faire de l'innovation il faut de la liberté, Reuillon argumente que la meilleure manière pour créer un environnement libre, c'est en faisant confiance aux personnes, en les laissant s'auto-organiser et s'auto-responsabiliser :

> « Le fait de développer de nouvelles choses demande de la liberté de pouvoir bidouiller […] pour moi ces règles-là, trop formelles et institutionnelles, ça bloque la créativité. […] il y a eu des malversations ici […] et ça aurait pu amener à plus de contrôle. Je lutte activement contre les contraintes en considérant qu'un exemple ce n'est pas la généralité. Une malversation c'est pas pour ça qu'il faut une règle générale. Le fait d'auditer et de monitorer est […] mieux que le fait d'empêcher. Et

[1698] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1699] *Ibid.*
[1700] *Ibid.*
[1701] *Ibid.*
[1702] *Ibid.*

> [aussi] le fait de prendre des responsabilités collectives, évitez de dire, 'C'est la responsabilité de machin uniquement'. […] Déjà c'est hyper-fragile comme système […] dès que t'as des conflits interpersonnels ça marche plus »[1703].

Ces discours favorables à des politiques d'*empowerment* des personnes, prônant la confiance interpersonnelle et le pouvoir de la responsabilisation collective, sont en accord avec la pensée décentralisée et auto-organisée, d'origine anarchiste ou libertarienne, des communautés *hackers* que Reuillon mentionne. Ces discours sont en accord également avec la vision des systèmes complexes sans centre organisateur qui dirige tout le reste. Ces discours s'accompagnent enfin avec une certaine pensée libérale :

> « *Question* : Tu te définis comme de gauche ?
> *Reuillon* : Non, [ma philosophie] peut être libéral[e] aussi. Je dirais que moi je suis complètement pour l'auto-organisation et pour la libre entreprise, de pouvoir créer, de trouver comment faire de la valeur avec ça pour avoir les moyens d'agir. Dans les systèmes économiques où l'incitation individuelle est bien pensée ou bien amenée […] ça mène aussi vers les biens communs de tout le monde »[1704].

Pour Reuillon, l'auto-organisation est transposable au niveau d'un pays, ce qui amène à une suppression ou à une forte réduction de l'État : « tu concilies à la fois la liberté et les biens communs sans avoir besoin de contraintes, de régulation, de plein de choses, le point de contrôle dans les systèmes où du coup t'aurais un État qui pourrait être corrompu comme on peut voir »[1705]. L'épitomé de cette philosophie ce sont les *blockchain*, « quelque chose d'assez révolutionnaire en informatique qui permet de créer des systèmes de règles qui font consensus et qui sont ouverts […] N'importe qui peut participer, c'est un système ouvert et pourtant c'est cohérent »[1706]. Les chaînes de bloc permettent, selon Reuillon, d'« inventer des systèmes dont les incitations individuelles sont bien alignées avec les incitations collectives »[1707]. Elles permettraient de « concevoir des systèmes économiques qui font que tu seras récompensé quand tu participeras bien et puni quand tu participeras mal, mais ça sera des règles économiques acceptées par tout le monde et tu n'auras pas vraiment besoin d'acteur central »[1708] : Reuillon fait référence à l'idée de l'économiste Robin Hanson de la « futarchie ». Système politique conçu par l'économiste Robin Hanson, la futarchie consiste à ajouter à la démocratie le principe selon lequel, quand un marché de prédictions estime qu'une certaine décision est susceptible d'augmenter la richesse

[1703] *Ibid.*
[1704] *Ibid.*
[1705] *Ibid.*
[1706] *Ibid.*
[1707] *Ibid.*
[1708] *Ibid.*

collective, telle décision devient une loi. Cette méthode a été employée dans de grandes entreprises, telles que Google, Yahoo ou Microsoft. Pourtant, dans l'optique de Reuillon, l'objectif techno-politique des chaînes de bloc est précisément de supplanter les GAFAM : « [il s'agit de] faire le Web 3.0 où du coup tu vires tous les systèmes centralisés et les silos des données. Donc tu vires Facebook, Google, Amazon »[1709]. Puisque « [c]es gens-là possèdent ton identité »[1710], Reuillon explique que l'on est en train d'imaginer des systèmes qui permettent de stocker toutes les données personnelles d'un individu de manière à être indépendants des fournisseurs de service : « Tu peux faire confiance au réseau »[1711]. Grâce à ce système structurellement horizontal, le « monopole [des GAFAM] ne restera pas »[1712].
Si l'appui des SSC franco-européennes sur des structures et des financements publics est marquante par rapport au cas américain, il reste que le régime mutualiste et « libriste » ne va pas à l'encontre de l'initiative privée et de l'entreprise. De manière conséquente, dans leurs discours, Reuillon, Leclaire et deux autres ingénieurs de l'ISC-PIF – Paul Chapron et Guillaume Chérel – travaillent à des projets financés par des entreprises privées. Ils leur proposent d'employer des adaptations spécifiques d'OpenMOLE pour améliorer les logiciels qu'elles utilisent en interne. Prenons l'exemple d'un projet sur lequel le collectif travaillait au moment de nos entretiens. Leclaire explique qu'il s'agissait d'aider une entreprise de conseil à rendre plus efficiente sa propre plateforme numérique. Celle-ci était une plateforme de simulation, censée prévoir les effets du déplacement d'une firme dans un système économique urbain donné :

> « Le projet c'est pour étudier l'impact du déménagement d'une entreprise. Donc alors, eux ils ont tout un système qui permet d'étudier tous les réseaux dans une ville, donc les réseaux de transport, les réseaux d'eau, d'électricité, de déchets, tout ça. […] Donc là nous ce qu'on va faire c'est pouvoir faire une étude de tout ce qu'ils ont là, sur leur modèle pour pouvoir gérer le réseau. […] [Si] je déménage une entreprise, est-ce que tout le monde démissionne, […] comment faire en sorte qu'on minimise le temps de trajet pour la plupart des gens ? »[1713].

Il s'agit donc, pour l'entreprise, d'« avoir une meilleure confiance dans [ses] modèles, et de pouvoir faire une aide à la décision sûrement de meilleure qualité »[1714]. Les ingénieurs d'OpenMOLE voient un triple intérêt dans cette expérience : la possibilité de perfectionner leurs outils, d'intégrer leurs salaires par un revenu complémentaire et de produire un bénéfice pour la société au sens large. En particulier, ce premier projet

[1709] *Ibid.*
[1710] *Ibid.*
[1711] *Ibid.*
[1712] *Ibid.*
[1713] Entretien avec Matthieu Leclaire, 13.02.17.
[1714] *Ibid.*

avec des entreprises représente pour eux le pas initial vers la fondation d'une entreprise OpenMOLE, qui leur permettrait de « pérenniser une équipe » et, seulement en second lieu, précisent-ils, d'intégrer leurs salaires de fonctionnaires :

> « l'idée […] d'avoir une entreprise c'est d'avoir des fonds que tu peux investir comme tu veux. Et de pouvoir dire, tiens, cette personne-là, je la veux en CDI […] sans avoir à dire : 'Non, tiens, il va falloir que tu passes un concours, un machin, avec les auditions incertaines […]' […] Et après, dans un deuxième temps […] [il s'agit] d'arriver à en tirer un petit bénéfice, mais ce n'est pas l'objectif principal »[1715].

Quant au bénéfice pour la société au sens large, cela ne s'éloigne pas des discours de promesse propres au SFI :

> « Et puis aussi, de se dire qu'il y a du transfert de technologie depuis les labos jusque dans les entreprises, quelque part je trouve ça cool aussi, parce que là tu vois par exemple, à l'échelle de la ville, enfin de cette boîte par exemple, de pouvoir se dire qu'ils vont pouvoir avoir des outils qui sont plus adaptés, qui vont pouvoir faire des meilleures prédictions, etc. globalement, la société va en bénéficier quoi »[1716].

Comment qualifier, en définitive, le projet politique des représentants des SSC français ? À la lumière 1) des influences anarcho-hackers de ce collectif de chercheurs, 2) de leur penchant redistributif et autogestionnaire, 3) de leur ouverture au monde de l'entreprise compensé par un faible intérêt pour le profit, et 4) de leur confiance dans les pouvoirs progressistes de la technologie, nous proposons de qualifier le projet politique des SSC françaises de *gauche libérale et technocratique*.

Conclusion

De part et d'autre de l'Atlantique, les sciences de la complexité apparaissent, par rapport à d'autres domaines technoscientifiques émergents, comme des domaines qui s'insèrent de manière originale dans le *régime de production des connaissances* contemporain, quelle que soit leur forme régionale spécifique. Ce faisant, les similitudes ne doivent pas faire oublier les profondes différences qui les opposent et qui nous empêchent de tenir un discours unique à leur propos. Les différences entre les deux concernent à la fois leur mode de fonctionnement institutionnel, leur mode de financement et leur projet politique global.

[1715] *Ibid.*
[1716] *Ibid.*

Quant au premier point, le SFI possède une direction centralisée et hiérarchique, composée de représentants du monde des donateurs privés et des scientifiques associés ou ayant été associés à l'institut dans le passé. Cette direction laisse tout de même beaucoup de liberté aux résidents (et encore plus aux simples associés) de chercher les financements qu'ils souhaitent pour les projets de recherche qui les intéressent, mais elle leur impose certains standards de productivité et de visibilité, faute de quoi les contrats peuvent être résiliés. Par contraste, les instituts de la complexité français se composent surtout de chercheurs et de chercheuses fonctionnarisés, lesquels mènent des projets de recherche disciplinaires liés à leurs institutions de rattachement principales ou bien mettent en place des services informatiques mutualisés par plusieurs institutions de recherche.

Quant au deuxième point, si le SFI se finance pour les deux tiers grâce aux entreprises et met en place des dispositifs, comme le *BusNet* puis *ACtioN*, pour servir ses donateurs privés et fédéraux sans déployer un travail de conseil officiel, les SSC franco-européennes ont bénéficié surtout des financements publics à la recherche provenant de Bruxelles, du CNRS, de la Région Île-de-France et de la Ville de Paris. Elles n'ont qu'occasionnellement reçu des financements privés, non pas tant en raison d'un échec dans la tentative de les intéresser, mais parce que cette tentative n'a souvent même pas été amorcée.

En ce qui concerne enfin le projet politique du SFI (mais aussi d'autres instituts similaires comme le New England Complex Systems Institute de Boston), il s'est agi depuis le début de déployer une *mathesis universalis* fondée sur l'usage de l'ordinateur afin de résoudre les problèmes majeurs du nouveau régime néolibéral mis en place aux États-Unis par Donald Reagan et dans d'autres pays par d'autres hommes et femmes politiques. Les objectifs du SFI ont ainsi été, parmi d'autres, d'assurer la paix mondiale et la place hégémonique des États-Unis dans le monde, d'éviter ou de prévoir des crises financières et de maximiser les profits des instituts de crédit, ainsi que d'augmenter la rationalisation, l'efficacité et la productivité des entreprises. Du coté des protagonistes français des sciences de la complexité, leur cadre a été plutôt celui donné par l'idée des biens communs, de la mutualisation des ressources et de l'ouverture des codes source des logiciels développés, dans le contexte d'une conviction techno-progressiste partagée. Dans le cas particulier de l'ISC-PIF, dont les objectifs généraux sont fixés par l'InSHS, et ont longtemps été supervisés par la philosophe Sandra Laugier, l'attention à l'utilité sociale a été particulièrement forte, se déclinant dans plusieurs formes de participation, comme l'attestent l'expérience de la co-écriture de la Loi Numérique ou les plateformes accessibles au grand public pour suivre des événements d'intérêt public, tels que la COP21 sur le climat ou les élections présidentielles de 2017.

Intermède – Domaines émergents et ingénierie de l’interdisciplinarité

Introduction à l'Intermède

Dans le lexique théâtral, l'intermède désigne la partie de l'entracte d'une pièce qui est jouée, chantée ou dansée dans le but d'abréger l'attente pour les spectateurs. Le présent Intermède n'abrège pas les distances entre l'Acte 1 et l'Acte 2, mais, comme dans le théâtre grec, il fait partie intégrante de l'intrigue. Il aborde en effet deux sous-questions qui ne se reflètent pas dans le titre de cette thèse, mais qui sont intéressantes en soi. La première concerne la qualification des domaines émergents interdisciplinaires, dont les SSC sont un exemple paradigmatique ; la deuxième vise la description des pratiques du travail scientifique interdisciplinaire. Souvent traitées par la littérature sur les sciences et les savoirs, ces deux questions, contenues dans les trois chapitres qui composent cet Intermède, peuvent être mises au jour d'une manière nouvelle et originale par le biais des sciences de la complexité.

Comment qualifier les SSC ? Spécialité, discipline, interdiscipline, méta-discipline, transcience, *zone de transaction*, discours rhétorique temporaire à finalité financière, ou quoi d'autre ? Dans le premier chapitre nous proposons, pour saisir le statut socio-épistémique particulier des SSC, un concept nouveau capable de rendre compte de la nature lâche de ce domaine interdisciplinaire. Ce concept est celui de *plateforme méta-disciplinaire* : il s'agit de communautés qui partagent un projet onto-épistémologique peu défini, un ensemble d'outils communs et des stratégies politico-institutionnelles convergentes. Sorte de confédérations, où chaque « nation » disciplinaire garde son autonomie tout en s'alliant avec d'autres pays du savoir qu'elle reconnaît comme autonomes, les *plateformes méta-disciplinaires* servent à permettre à des scientifiques hétérogènes de se rencontrer et de collaborer, pour atteindre un certain nombre d'objectifs théoriques, sociaux et institutionnels communs ou analogues. Les plateformes méta-disciplinaires partagent une série de lieux, tels que des instituts, des conférences ou des sociétés savantes, où elles peuvent discuter, collaborer, échanger et concevoir des stratégies pour s'élargir ou pour survivre. Afin de trouver une cohérence dans l'extrême diversité, les outils théoriques et techniques sont particulièrement ductiles.

En ce qui concerne les pratiques de l'interdisciplinarité, le deuxième chapitre fournira une classification selon différents idéaux-types des formes du travail scientifique interdisciplinaire observées sur le terrain des SSC. Cette catégorisation énumère cinq figures du travail scientifique interdisciplinaire : les *transfrontaliers*, qui collaborent avec des scientifiques d'une autre discipline en co-construisant avec eux un nouveau langage intermédiaire, encore que simplifié ; les *ambassadeurs*, dont la compétence liée à la maîtrise de deux langages disciplinaires donnés leur permet de se poser en intermédiaires pour faciliter la communication entre sous-équipes de spécialités différentes à l'intérieur d'une même équipe de recherche ; les *polyglottes*, qui

maîtrisent plusieurs langages scientifiques et qui souvent dirigent des équipes pluridisciplinaires ; les *bilingues*, qui maîtrisent au moins deux langages scientifiques et qui mènent un travail interdisciplinaire de manière surtout individuelle ; et les *traducteurs*, qui maîtrisent des outils scientifiques pouvant être appliqués à plusieurs domaines disciplinaires différents, sans avoir besoin d'en apprendre les langages et les débats propres, et sans forcément devoir entamer des collaborations avec d'autres chercheurs et chercheuses.

Le dernier chapitre de l'Intermède aborde l'usage intentionnel et effectif que les scientifiques font de l'architecture des instituts de la complexité pour encourager les collaborations entre chercheurs et chercheuses porteurs de savoirs différents. Dans les discours (promoteurs ou analytiques) sur l'interdisciplinarité, il est rare de trouver une réflexion sur le rôle de l'architecture dans le travail scientifique interculturel. Même si le questionnement sur la manière dont on encourage, facilite et implémente l'interdisciplinarité existe, il porte le plus souvent sur le rôle des métaphores, sur la création de langages *pidgins* ou bien sur la nature des outils méthodologiques à employer pour asseoir un dialogue entre chercheurs et chercheuses de cultures différentes. L'un des aspects les plus intéressants des SSC réside dans le fait que ses représentants mènent une réflexion explicite sur l'architecture des instituts qu'ils mettent en place. Dans le dernier chapitre, on verra enfin que les édifices du SFI et de l'ISC-PIF, ayant été expressément conçus pour favoriser les interactions interdisciplinaires, finissent par les entretenir plus que par les générer *ex novo*.

Comment qualifier le domaine des SSC ?

Introduction

Ce chapitre se compose de deux parties. La première traite des différentes visions et définitions que les scientifiques liés aux systèmes complexes ont de ce domaine. On y examinera d'une part la mutation du discours des fondateurs et des entrepreneurs scientifiques entre les débuts et la suite : initialement penchés pour la fondation d'une nouvelle discipline, ils abandonnent progressivement la tâche. D'autre part, on y verra que la vision que les différents praticiens des systèmes complexes ont de leur domaine varie énormément, le voyant parfois comme une « transcience », parfois comme une « perspective ».
Dans la deuxième section on se demandera quelle qualification sociologique attribuer aux SSC. Une revue de la littérature (nécessairement incomplète face à la pléthore de textes) montrera que les travaux existants ne fournissent pas des concepts spécifiques pour saisir un domaine interdisciplinaire comme celui des sciences de la complexité. On y avancera un terme *ad hoc* : celui de *plateforme méta-disciplinaire*. Il s'agit de points de rencontre entre disciplines différentes, lesquelles trouvent un terrain d'entente épistémique, instrumental et organisationnel dans une définition et dans une ontologie de leurs objets d'études, partagées du fait de leur indétermination même. Les disciplines sont mobilisées pour la mise en place d'espaces de travail communs et dans la poursuite d'objectifs institutionnels analogues. Autrement dit, les SSC fonctionnent comme un espace socio-épistémique, tenu ensemble par des discours et des pratiques plurielles et variables, dont l'objectif est de fournir un refuge temporaire ou une maison définitive à certains scientifiques difficilement classables, ou encore d'assurer à des chercheurs et des chercheuses marginaux dans leurs champs un appui pour revenir ensuite vers leurs disciplines de départ, forts de nouvelles méthodes et d'une nouvelle légitimité.

Les différentes visions des SSC des praticiens de la complexité

Cowan faisait preuve de prudence, lorsqu'il se référait à la nécessité d'une temporalité longue, de cinquante à cent ans, et d'un « sacré boulot », pour que la science de la complexité s'établisse[1717]. Sous la présidence de Geoffrey West, la complexité est utilisée comme maître-mot identitaire du SFI, mais sans aucun programme disciplinaire derrière. À partir de la fin des années 1990, ce terme indique, dans le même institut, bien plus une approche interdisciplinaire et une « façon de voir »

[1717] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 8.

qu'une discipline[1718]. Même s'il est vrai que le discours peut osciller : dans le bulletin du printemps 2008, à l'occasion d'un compte-rendu de l'école d'été 2007, l'étude des systèmes complexes est à nouveau appelée « discipline »[1719]. Mais depuis l'époque d'Ellen Goldberg, notamment après l'article de John Horgan *From complexity to perplexity* paru en 1995, l'interdisciplinarité est mise en avant comme la marque de fabrique du SFI bien plus souvent que la poursuite d'une théorie commune à tous les systèmes complexes. En outre, même à l'intérieur de la première phase de l'institut, l'on observe un glissement progressif du singulier « science » au pluriel « sciences de la complexité »[1720].

Gérard Weisbuch, qui a participé aux premières années du bouillonnement du SFI, croit encore partiellement en cette idée, lorsqu'il écrit un rapport pour la Commission Européenne sur les SSC en 2007[1721]. La conviction de l'existence de cette science était propre aussi aux entrepreneurs scientifiques franco-européens, lorsqu'ils utilisaient la formule de « science des systèmes complexes » dans la feuille de route européenne[1722]. Les *Program Officers* de Bruxelles, Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, ont également cru dans le dessein d'une telle discipline, puisqu'ils ont financé au moins deux projets pour la simple constitution du domaine : les projets Open Network for Connecting Excellence in Complex Systems (ONCE-CS)[1723], financé par FP6 de 2005 à 2007, et General Integration of the Applications of Complexity in Science (GIACS)[1724], financé par FP6 de 2005 à 2009. Ces actions visaient, parmi d'autres choses, à identifier des questions transversales aux systèmes complexes, à encourager les collaborations académiques, industrielles et gouvernementales, à coordonner un doctorat dans le domaine, à développer des outils numériques partagés par la communauté et à fonder la *European Complex Systems Society*.

Avec le passage du temps, cet objectif s'est estompé, de part et d'autre de l'Atlantique. La bio-informaticienne Melanie Moses, arrivée aux SSC après la lecture des livres de Gleick et Waldrop, ne croit pas que ce domaine soit une discipline. Elle le définit plus comme un « état d'esprit » : « [Complex systems are a] sort of a framework or a frame of mind »[1725] ; ou comme une philosophie transposable à plusieurs disciplines : « in some ways I think it's a little more a philosophy and an approach than a discipline […] that can be used in many different disciplines »[1726]. L'anthropologue Jeremy Sabloff,

[1718] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1, p. 53.
[1719] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 44.
[1720] Le terme de « complexité » est utilisé plus souvent dans les pays anglo-saxons qu'en Europe, où on préfère faire référence aux « systèmes complexes ».
[1721] « The promise of the *science of complexity* is to provide, if not a completely unified approach, at least *common tools* to tackling complex problems arising in a wide range of scientific domains » : Weisbuch, G. (éd.), *Tackling Complexity in Science*, European Commission, Directorate-General for Research, 2007, archives de Gérard Weisbuch, p. 3.
[1722] Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, *op. cit.*, p. 31.
[1723] Site official du projet ONCE-CS: https://cordis.europa.eu/project/rcn/80603_en.html.
[1724] Site official du projet GIACS: https://www.cordis.europa.eu/project/rcn/74731_en.html.
[1725] Entretien avec Melanie Moses, 27.03.15.
[1726] Entretien avec Melanie Moses, 21.09.16.

président du SFI de 2009 à 2015, considère les SSC comme un ensemble de méthodologies et comme une perspective ou une *forma mentis* : « I don't think of it as a discipline at all. I think it's a… it's certainly methodological or includes a variety of methodological approaches. But I think it's more a perspective »[1727]. Certains membres externes du SFI, comme l'informaticien David Ackley, refusent la formule même de systèmes complexes : « That's like saying, 'What is the name of something that is not a piece of bread?'. Well there is no name for things that are not a piece of bread except for 'not a piece of bread' and it's not helpful a description »[1728]. En France, Romain Reuillon change sa manière de parler des systèmes complexes en fonction des personnes avec qui il interagit. Pour lui les SSC fournissent une manière de voir les choses : « Quand on me demande un peu ce que je fais… ça dépend de la personne à qui je m'adresse, parce que pour moi c'est juste un cadre, c'est un a priori sur la façon de voir les choses »[1729]. Le sien est un travail de démarcation assumé et non dépourvu d'ironie :

> « Du coup il peut y avoir deux objectifs. Quand j'ai pas envie de discuter, [le but] c'est les désintéresser, et quand j'ai envie de discuter, c'est de les intéresser. Par exemple si jamais j'ai quelqu'un qui a un a priori que la science ne sert à rien, je vais faire en sorte de converger très rapidement vers des applications et presque partir des exemples. Le cadre général que j'ai derrière ça va être toujours de parler de l'interaction, du passage de l'interaction au mouvement collectif. […] Après si ça m'embête, si la question je la sens agressive, je dis, 'Bah moi je fais que de l'informatique' »[1730].

Pour Pumain, la science des systèmes complexes « c'est difficilement une seule discipline » ; selon elle « il vaudrait mieux peut-être la mettre au pluriel », cela en raison d'un refus du réductionnisme : « On ne peut pas rabattre la sociologie sur la biologie et la politique uniquement sur la sociologie et ainsi de suite »[1731].
Les exemples pourraient se multiplier mais, sur les deux centaines d'entretiens que nous avons réalisées, moins d'une dizaine d'interviewés seulement considèrent qu'une discipline des systèmes complexes existe, ou qu'elle est en train de se construire, ou bien qu'il fallait tout faire pour la construire et la stabiliser. Cela indique une vraisemblance statistique, puisque nous avons veillé à multiplier les sites d'enquête, mais aussi à interviewer des chercheurs très différents : nous avons en effet rencontré

[1727] Entretien avec Jeremy Sabloff, 23.09.16. Sabloff écrit en outre : « how did SFI come into such high regard ? After all, we didn't invent the run-flat tire or cure cancer. No. I think what makes SFI special […] is a way of thinking. It's a rejection of compartmentalized thought and an enthusiasm for asking big, bold questions. It's looking at the long-term and not just the short-term. It's seeking answers from a multitude of perspectives and disciplines » : SFI, *Santa Fe Institute 2012 Annual Report*, 2012, p. 1.
[1728] Entretien avec David Ackley 27.09.16.
[1729] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1730] *Ibid.*
[1731] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.

tout à la fois des « stars » du domaine, des fondateurs et militants, des jeunes chercheurs et chercheuses, des postdoctorants, des doctorants, des assistants de gestion, des politiques, des fonctionnaires, des journalistes scientifiques, etc.
Cela serait toutefois une simplification que de dire que le projet d'une science de la complexité existe seulement au début de l'histoire de ce domaine et qu'il a été abandonné par la suite. Entre 2003 et 2010, les entrepreneurs scientifiques franco-européens ont en effet tenu la même rhétorique que les fondateurs du SFI entre 1984 et 1996. On pourrait dès lors penser que la rhétorique d'une science de la complexité n'est agitée qu'au début de son lancement, à des fins uniquement stratégiques pour obtenir l'accord des financeurs. Mais cela comporterait encore une autre simplification. Nous nous sommes plutôt aperçu que, à toute époque, il y a au moins quatre idéaux-types dans la communauté des SSC.

Quatre types de représentants des SSC

Tout d'abord nous avons les *militants* ou *activistes* : George Cowan, Murray Gell-Mann, David Krakauer, Paul Bourgine, Michel Morvan et Jeffrey Johnson, pour n'en nommer que quelques-uns, *croient* en ce qu'ils promettent, décrivent et performent. Par tous leurs comportements, ils font passer l'idée selon laquelle, d'après eux, la science de la complexité n'est pas une jolie formule pour trouver des financements : ils la défendent en dehors des cadres stratégiques, ils font des choix de vie personnelle en son nom, ils la portent au cours des années et surtout ne l'abandonnent pas au profit d'une formule plus avantageuse quand elle n'a pas marché. Gérard Weisbuch, qui appartient également à la catégorie, estime qu'il faut encore du temps pour que les SSC deviennent une discipline[1732]. D'ailleurs, ce premier idéaltype n'inclut pas que les fondateurs, les entrepreneurs de science ou les *seniors*, mais aussi certains postdoctorants : l'informaticien et mathématicien Joshua Grochow, Omydiar Fellow du SFI de 2014 à 2017, travaille à présent précisément à une théorie mathématique générale des systèmes complexes[1733].
Sans aucune référence au communisme libertaire, on pourrait appeler la deuxième catégorie de chercheurs et chercheuses celle des *plateformistes*, car pour eux et pour elles les SSC constituent une plateforme sur laquelle on peut s'appuyer à des moments de la carrière ou en parallèle de la carrière principale. Plusieurs sous-typologies peuvent être identifiées. D'abord celle de ces scientifiques, avec une position établie et une reconnaissance acquise dans un domaine précis, qui décident de faire de l'interdisciplinarité en fin de carrière ou en parallèle de leur activité disciplinaire principale. Cela peut être à la fois « pour se faire plaisir » et pour chercher des idées nouvelles, comme le témoigne Chavalarias qui, pour rendre l'interdisciplinarité légitime, prône son institutionnalisation :

[1732] Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.
[1733] Entretien avec Joshua Grochow, 07.10.16.

> « Donc c'est l'idée de dire, 'On va créer une interdiscipline', enfin on va favoriser, on va essayer de l'institutionnaliser, parce que quand un truc n'est pas institutionnalisé, c'est très très dur de le développer […] typiquement si tu interroges des physiciens ou des informaticiens etcetera, beaucoup vont te dire, 'Moi quand je publie, si je veux avancer dans ma carrière, il faut que je publie dans une revue d'informatique […] et puis pour me faire plaisir je vais à une conférence systèmes complexes ou je fais des trucs, parce que ça c'est de l'interdisciplinarité, c'est là où je pense qu'il y a des choses nouvelles'. L'idée c'était de faire reconnaître ce type d'interdisciplinarité, et le fait que ça nécessite des moyens, le fait de pouvoir se rencontrer, de pouvoir s'affirmer et pas de se cacher entre guillemets »[1734].

Une autre sous-catégorie concerne ceux et celles qui participent aux SSC pour renouveler leur propre discipline – ce qui est le cas par exemple de la géographe Denise Pumain, qui travaille depuis le début de sa carrière à la constitution d'une géographie quantitative en puisant dans les sciences de la complexité pour saisir ses méthodes et ses outils techniques principaux.
Pour une autre sous-catégorie, en revanche, les SSC forment une maison temporaire ou définitive où ils peuvent être accueillis après avoir accompli des conversions qui les rendent difficilement assimilables dans les domaines normalement reconnus. Le physicien Pablo Jensen, ayant migré dans l'économie et dans l'application des réseaux aux systèmes sociaux, s'est retrouvé « nulle part vraiment » ; les systèmes complexes ont représenté pour lui un espace pluraliste et inclusif où pouvoir conduire librement ses recherches interdisciplinaires :

> « je venais de la physique, matière condensée, nanostructures, rien à voir. Et je suis parti vers l'économie parce que les systèmes sociaux m'intéressaient, donc j'ai été dans un laboratoire d'économie. Je commençais à n'être plus nulle part vraiment, ni en physique ni en économie. Et quand j'ai su que [l'IXXI] existait, je me suis dit, 'Ah bon cela c'est un bon chapeau pour moi parce que cela rassemble des gens qui ne sont plus complètement quelque part'. Et c'est là que j'ai découvert que les systèmes complexes existaient »[1735].

Une dernière sous-catégorie est représentée par la physicienne et épidémiologiste computationnelle Vittoria Colizza, qui de la physique est passée au domaine

[1734] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1735] Jensen, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.

interdisciplinaire des systèmes complexes pour préparer sa conversion dans l'épidémiologie[1736].

Une troisième catégorie est celle de ces chercheurs et chercheuses qui adhèrent d'une manière ou d'une autre au domaine des SSC, sans forcément le considérer comme une discipline, mais qui affichent leur appartenance par intermittence ou ne l'affichent guère. Colizza appartient également à cette catégorie, parce qu'elle participe de temps à autre à des conférences des SSC – même si elle préfère nettement celles concernant les réseaux et l'épidémiologie –, mais quand elle publie ses articles scientifiques elle n'emploie presque jamais le terme de « système complexe », ni dans le texte de l'article, ni dans le titre, ni dans les mots-clés. On propose d'appeler cette catégorie celle des *cripto-complexologues* à la suite de Dumoulin et Ollivier, qui parlent de « crypto-systématiciens » dans leur étude sur la systématique ou taxonomie[1737] : pour des raisons stratégiques cet idéaltype préfère ne pas employer l'étiquette des SSC afin d'éviter le rejet de ses recherches ou le discrédit. Selon Fernandez-Villacañas, cela arrive « très souvent » : « people are shy, they shy away from mentioning complex systems science »[1738]. D'après le commissaire espagnol, il s'agirait d'une stratégie de survivance de la part des scientifiques, liée notamment à la volonté de ne pas paraître arrogants et vexants à l'égard des collègues qui n'utilisent pas les mêmes méthodes « révolutionnaires ». En prenant pour exemple un économiste italien, que nous laisserons anonyme, Fernandez-Villacañas et Dum illustrent leur impression ainsi :

> « *Fernandez-Villacañas* : I was discussing with [Anonymisé] in these days, he's trying to use these new ideas on network science inspired in complex systems science to study shocks to financial markets and so on. He's very shy to say that this is really new ideas stemming from complexity science.
> *Question*: Why ?
> *Ralph Dum* : because it revolutionizes economics.
> *Fernandez-Villacañas* : they're afraid, in a way, to be offensive. To say look, 'You have to treat these systems in a completely different way, otherwise you are wrong'. This is very hard to accept [for their colleagues] »[1739].

La quatrième et dernière catégorie est celle des doctorants et postdoctorants qui se retrouvent dans un laboratoire, dont le directeur ou la directrice s'inscrit dans les SSC, et qui, interrogés sur les raisons de leur présence dans cette équipe-là, ne mentionnent à aucun moment l'étude des systèmes complexes. Dans le laboratoire du CNRS à Gif-sur-Yvettes, BioEmergence, nous avons rencontré des biologistes qui voulaient « faire

[1736] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[1737] Dumoulin, D. & Ollivier, G., « Comment peut-on être systématicien ? Faire exister une communauté scientifique : le cas français dans la dynamique internationale », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2013, vol. 7, n. 2, p. 395.
[1738] Fernandez-Villacañas, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1739] Entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.

des belles images », des ingénieurs qui souhaitaient « développer des microscopes », des informaticiens qui voulaient « faire des simulations » et des polytechniciens intéressés par les neurosciences et qui sont arrivés au laboratoire parce qu'intéressés par le directeur de l'UMR, un neurologiste. Nous n'avons pas rencontré de jeunes chercheurs et chercheuses qui étaient attirés par les SSC en tant que telles et par leur programme disciplinaire. Nous pourrions appeler une telle catégorie celle des *alliés temporaires* des SSC. Colizza explique que, puisqu'ils n'ont pas « vécu cette histoire, ils ne la connaissent pas (ce n'est pas un déficit) et donc ils se trouvent face à plusieurs choix et finissent par choisir les systèmes complexes par feeling, exposition, disponibilité de bourses »[1740]. Ceux-ci sont les premiers à ne plus se décorer de l'étiquette des SSC dès qu'ils partent dans d'autres laboratoires ou se financent par d'autres bourses.
D'ailleurs l'abandon du mot-clé ne concerne pas que les *alliés temporaires* mais peut concerner même les *plate-formistes* et les *crypto-complexologues*, notamment lorsque l'air du temps change au niveau des financements publics à la recherche et que labéliser un projet avec le terme de « systèmes complexes » n'est plus avantageux :

> « The label 'complexity' and 'complexity science' sometimes gets a kind of ambiguous reputation. [...] We were making a project, then came the question whether to put complexity in the title, and everybody said it was too oversold, we cannot associate with that. We have to come up with something else. [...] In England a colleague of mine told me that complexity is not the actual term for application, now it's industrial mathematics, you know, they push towards real application »[1741].

Même les militants ne s'accordent pas sur la définition des SSC

Les directeurs des instituts de la complexité sont souvent des *militants* ou des *activistes*. Jennifer Dunne, vice-présidente des affaires académiques du SFI, décrit la mission du président David Krakauer, en expliquant que ce biologiste a été choisi par les conseils scientifique et d'administration de l'institut afin de renouveler le projet de fondation d'une science des systèmes complexes. Sa tâche est celle de redynamiser le centre : « David […] was hired by the board in consultation with all of us basically […] to reinvigorate and bring back […] some of the excitement [of the beginning] and […] to transform complex system science for the next thirty, forty, fifty years »[1742]. Dans les derniers numéros du bulletin du SFI disponibles, Krakauer parle d'une « transcience », ce qui, au dire de Dunne, n'implique pas le remplacement des autres disciplines par une nouvelle discipline :

[1740] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[1741] Entretien avec Joachim Krug, 18.11.15.
[1742] Entretien avec Jennifer Dunne, 06.10.16.

> « How does it interface with the traditional disciplinary sort of approaches to knowledge ? Because those are important too of course ; it's not like complexity science is here to replace that. We all have our areas of expertise ; mine is ecology but what I do is much broader than that »[1743].

Dans un seul mouvement, qui mélange les registres de la nécessité épistémologique, de la promesse et de la prédiction, Krakauer affirme qu'un certain nombre de principes mathématiques, computationnels et logiques devraient être mis au service d'un effort de synthèse qui dépasse les disciplines individuelles :

> « We have reached a stage where the pace of discovery and the nature of shared knowledge bring the whole venerable exercise of disciplinary fads into question. I believe we are entering a period of transcience, where it is becoming necessary that training in areas with fundamental mathematical, computational, and logical principles should be emancipated from a single class of historically contingent case studies. […] Transcience is an expression that seeks to recognize the pursuit of plenary or synthetic knowledge as an institutional priority »[1744].

Pour Krakauer, il ne s'agit pas d'abandonner la méthode scientifique, faite d'expériences, d'observations et d'analyses, mais de comprendre que, si les problèmes les plus pressants d'aujourd'hui se trouvent dans les interstices entre les disciplines, alors le besoin de méthodes transversales devient urgent :

> « The alternative is not to neglect the details of a system, but to recognize that many of our most pressing problems and most interesting challenges reside at the boundaries of existing disciplines, and require the development of an entirely new kind of sensibility that remains 'disciplined' by careful empirical experiment, observation, and analysis »[1745].

Ensuite, l'actuel président du SFI relativise les SSC, en les considérant comme un domaine cantonné à l'étude d'un petit ensemble de modèles – ce qui laisse entrevoir que la transcience qu'il préconise doit être bien plus large : « The sciences of complexity are our best working examples of transcientific research, but remain restricted in part through the association of complexity with a small class of models »[1746].
Il s'agit d'une opinion assez proche de celle que nous relevons à Bruxelles chez Dum, qui compare les SSC à l'algèbre, en les voyant comme des méthodes utiles à plusieurs

[1743] *Ibid.*
[1744] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2011, Vol. 25, p. 2.
[1745] *Ibid.*
[1746] *Ibid.*

figures disciplinaires ; pour lui, parler de discipline pour l'étude des systèmes complexes « ça n'a aucun sens » :

> « there are lots of things that were not disciplines which are now disciplines. […] Disciplines are around specific objects. Molecular biology came up because there was the need to study proteins. In complex systems it's more diffuse. It doesn't address a concrete need. Complex systems is important to understand many things. It's a bit like mathematics. Many people from complex systems come from mathematics and physics, so you may see complex systems science as a subdiscipline of maths and physics. It would be too abstract to say, 'I'm a complex systems scientist or doctor'. So what ? […] [To consider it a discipline] doesn't make any sense. It is many disciplines working together. [...] As economists have to have a comprehension of algebra, I think every economist should have an understanding of complex systems. The fact that economies are not in equilibrium and are always dynamical is something they should understand »[1747].

Fernandez-Villacañas a une opinion différente. Tout en le voyant comme un ensemble d'outils, il espère que le domaine des systèmes complexes devienne formellement une discipline, avec son propre échafaudage théorique :

> « it's a collection of tools. Without still the proper theoretical underpinnings. There is the need for theoretical work to make it a proper science. […] If 'complex systems' wants to become a real science, it has to have a real body of theories and body of methods that give complex systems its name. And that is not the case yet. […] it's my wish, it's my hope that it will be »[1748].

Quant à Bourgine, il fait allusion aux rencontres de Cargèse, qui conduisirent aux feuilles de route des SSC françaises. Le débat se conclut avec la décision de parler de « systèmes complexes » plus que de « complexité », concept pour lequel existe, dit-il, au moins une vingtaine de définitions :

> « On n'a pas mal débattu par rapport à la définition entre science de la complexité et sciences des systèmes complexes. La première n'était pas très claire car il y a une vingtaine de définitions différentes de la complexité, et à ce moment-là les gens se battent pour la définition et cela n'est pas du tout intéressant. Alors que dans la nature il y a des systèmes complexes, ce qui fait qu'il y ait une science des systèmes complexes »[1749].

[1747] Dum, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1748] Fernandez-Villacañas, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1749] Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.

Nous avons vu que Bourgine regarde avec beaucoup d'intérêt du côté du SFI, pour s'en inspirer à la fois pour la science à développer et pour les stratégies institutionnelles à suivre. Toutefois il ne semble pas être dans la reproduction pure et simple du modèle transatlantique. Non seulement Bourgine critique, de son point de vue, les limites de l'institut américain – « en général [le SFI] n'est pas allé si loin dans l'étude phénoménologique [à savoir la reconstruction du passage du niveau micro au niveau macro] »[1750] –, mais il a également proposé, avec Michel Morvan qui est à l'origine de cette idée, d'introduire des nouveaux éléments dans la physionomie des SSC. Dans la convention du GIS RNSC, les deux assument les habits de théoriciens de la science et distinguent entre deux formes d'interdisciplinarité, l'une verticale et l'autre horizontale. Celle verticale représente les disciplines qui surgissent de la rencontre entre deux ou plusieurs disciplines préexistantes pour aborder un objet d'étude en particulier (biologie moléculaire, neuro-économie, biologie des systèmes, sciences cognitives) ; la deuxième se réfère à la science des systèmes complexes qui étudie une même question sur plusieurs objets différents :

> « Les systèmes complexes peuvent être soumis à deux types de démarches interdisciplinaires. La première consiste à se donner un objet de recherche intrinsèquement multidisciplinaire et conduit à poser des questions sur un même objet à partir de différents points de vue. La seconde consiste à étudier une même question à propos d'objets de recherche différents. C'est cette seconde démarche qui relève d'une science des systèmes complexes. Les deux démarches sont 'duales' l'une de l'autre et se renforcent mutuellement »[1751].

L'approche verticale « jette des ponts entre les échelles, les niveaux d'organisation et les disciplines qui les étudient » tandis que l'approche horizontale « consiste alors à étudier la même question théorique […] dans différentes disciplines »[1752]. Dans la convention GIS, l'ISC-PIF et l'IXXI sont cités comme des exemples de la deuxième approche, alors que l'Institut d'épigénomique d'Evry ou l'Institut de Recherche Interdisciplinaire de Lille relèveraient de la première[1753].
Chavalarias tient à souligner le fait que les SSC ne sont pas une discipline qui érige des frontières mais un espace interdisciplinaire qui travaille justement pour réduire les frontières :

[1750] Paul Bourgine, commentaire personnel du 06.03.14.
[1751] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 9.
[1752] CNRS, INSERM, INRA, INRIA, CEMAGREF, IRD, CGE, CPU, IFREMER, CIRAD, « Avenant n.2 à la Convention constitutive du GIS 'Réseau National des Systèmes Complexes' », archives du RNSC, 2009.
[1753] CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005, p. 15.

« Parfois je discute avec des gens qui se voient pas forcément systèmes complexes et ces gens-là ont l'impression que quand on anime la communauté systèmes complexes on a envie que tout le monde s'affilie […]. Je pense qu'il faut pas mettre trop de choses sous le concept […] Quand on monte des structures autour de la notion de systèmes complexes, c'est pas pour dire, 'Il y a une nouvelle discipline et donc il faut se dire, soit t'es dedans, soit t'es plutôt biologiste etc.' »[1754].

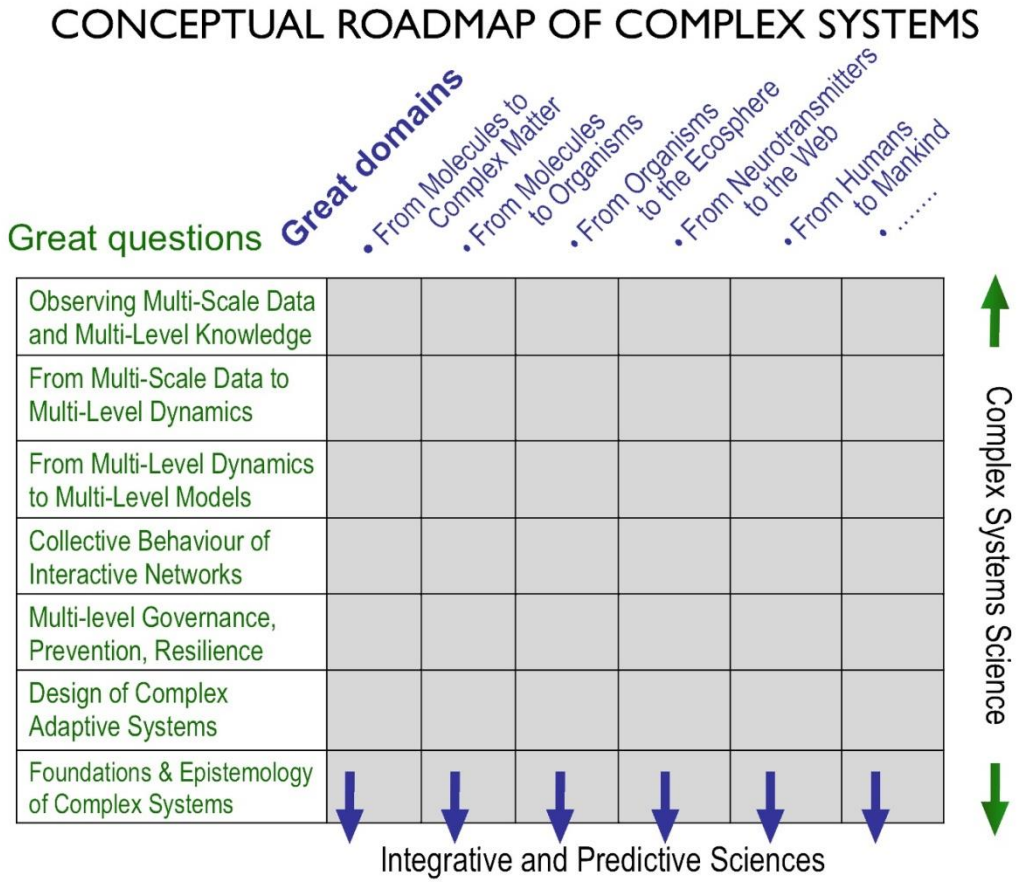


Figure 5. Conceptual Roadmap of Complex Systems, tiré du site officiel du Digital Campus of Complex Systems (UniTwin UNESCO) : http://www.cs-dc.org/cs-dc-roadmap.html

Le physicien et épidémiologiste computationnel Alessandro Vespignani voudrait carrément abattre les disciplines et pense qu'il faudrait beaucoup plus d'instituts de la complexité dans le monde, pour agréger des personnes de cultures scientifiques différentes et créer de l'innovation[1755].

Nous disions que les directeurs et les présidents des instituts de la complexité en général militent pour la mise en place du domaine. Cela paraît logique et pourtant ce n'est pas toujours le cas. Lorsque Pablo Jensen et Guillaume Beslon ont pris la relève de la direction de l'IXXI de Lyon après la migration dans le monde de l'entreprise de

[1754] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[1755] Entretien avec Alessandro Vespignani, 11.07.16.

Michel Morvan, ils l'ont fait avec beaucoup de scepticisme vis-à-vis de la rhétorique qu'avaient tenue les entrepreneurs scientifiques pendant la fondation des GIS :

> « quand Michel a dit, 'Il faut quelqu'un qui reprenne l'institution', […] j'ai dit, 'Mais écoute, toi tu as toute une rhétorique du système complexe dans laquelle moi je ne crois pas du tout et je ne vois pas comment je pourrais convaincre des gens de financer un truc dans lequel moi je ne crois pas' »[1756].

Jensen et Beslon sont ensuite tombés d'accord sur « une argumentation alternative »[1757] : en refusant l'idée selon laquelle l'informatique « allait s'étendre à tout et que l'on pouvait tout modéliser », ils ont accepté de reprendre la direction de l'institut en voyant les systèmes complexes comme « un parapluie commode pour l'interdisciplinarité »[1758]. Beslon décrit l'IXXI comme une zone d'autonomie temporaire[1759] vouée à disparaître :

> « Moi je considère qu'un institut comme celui-là c'est l'équivalent d'une TAZ, tu connais l'expression, donc Temporary Autonomous Zone ? Donc c'est en fait un espace où tu es relativement à l'aise pour faire des trucs indépendamment des grandes structures, des grands éléments qui structurent la science. En gros, tu as une zone de liberté. […] Et temporaire pour moi. C'est-à-dire que moi j'ai toujours dit […] 'La vocation de l'IXXI c'est de disparaître'. […] Et cette idée-là vient du fait que je ne crois pas aux sciences de la complexité »[1760].

Pour Beslon, l'existence des SSC est « purement rhétorique »[1761] ; Jensen, qui est d'accord avec lui, affirme donc s'être retrouvé « à la tête [de l'IXXI] un peu par accident »[1762].

La taille de la communauté internationale des SSC

Pourquoi donc, pendant une dizaine ou quinzaine d'années, l'Europe a vu un fleurissement de projets, d'instituts, de fédérations régionales et d'associations fléchés « systèmes complexes » ? Pour Beslon, « les institutions ne mettent de l'argent que sur les trucs nouveaux »[1763], en entendant par ceci que les entrepreneurs scientifiques franco-européens des SSC avaient réussi à faire passer le domaine lancé par le SFI trente ans auparavant pour une nouveauté. Toujours selon le bio-informaticien, il s'est

[1756] Jensen, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[1757] *Ibid.*
[1758] *Ibid.*
[1759] Bey, H., *TAZ, zone autonome temporaire*, Paris, Éditions de l'Éclat, 1997.
[1760] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[1761] *Ibid.*
[1762] *Ibid.*
[1763] *Ibid.*

agi d'un « jeu » institutionnel de la part des entrepreneurs scientifiques (« pour moi ces gens-là, c'est avant tout des politiques »[1764]), consistant à créer une étiquette pour ensuite en profiter en termes de financements : « d'un côté tu te débrouilles pour créer les *buzz words* et d'un autre côté tu te places sous les *buzz words*. C'est un jeu »[1765]. Dum et Fernandez-Villacañas expliquent que, puisque les SSC ont pu paraître parfois « sexy »[1766], certains scientifiques ont postulé pour des financements fléchés « systèmes complexes », alors que les recherches proposées, d'après les fonctionnaires européens, ne s'y inscrivaient pas vraiment :

> « *Dum* : sometimes I've seen people applying for complex systems funds saying that what they have been doing was complex systems science.
> *Fernandez-Villacañas* : sometimes you have people saying they have ideas from complex systems science while they don't »[1767].

Certains, en dehors du domaine en question, se font « sociologues externalistes » et réduisent l'essor des SSC presque seulement aux capacités de marketing des entrepreneurs scientifiques qui les ont portées au niveau franco-européen ; comme l'affirme ce chercheur que nous laissons anonyme :

> « Les SSC sont pour avoir de l'argent, c'est à la mode. [Les fondateurs sont] très bon vendeur[s]. En Europe elles n'existaient pas, c'est eux qui les ont lancées. Leur génie a été de fédérer des gens qui étaient en marge de leur domaine […] autour d'un nom joli. […] C'est des gens pas bons en math qui sont partis en SSC »[1768].

Les témoignages critiques de Jensen, Beslon et de l'anonyme, ainsi que les déclarations de Dum et Fernandez-Villacañas donnent l'impression que les SSC sont, plus qu'une discipline, un effet de mode ou un expédient rhétorico-stratégique pour drainer des fonds publics. En même temps, la communauté française semble la plus nombreuse et productive.
Chavalarias a développé un logiciel en ligne, appelé *Community Explorer*[1769] et accessible par le site officiel de l'ISC-PIF, qui est censé être une base de données rassemblant la communauté des SSC mondiale. Si nous sélectionnons les pays occidentaux que, grâce à notre terrain, nous savons être les plus actifs dans le domaine, à savoir les États-Unis, la France, l'Angleterre, l'Italie, la Belgique, l'Espagne, l'Allemagne et la Suisse, nous observons une écrasante majorité de français (fig. 6).

[1764] Entretien avec Guillaume Beslon, 15.09.15.
[1765] *Ibid.*
[1766] Fernandez-Villacañas, dans l'entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1767] Entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
[1768] Entretien avec anonyme.
[1769] Site du Community Explorer : https://communityexplorer.org.

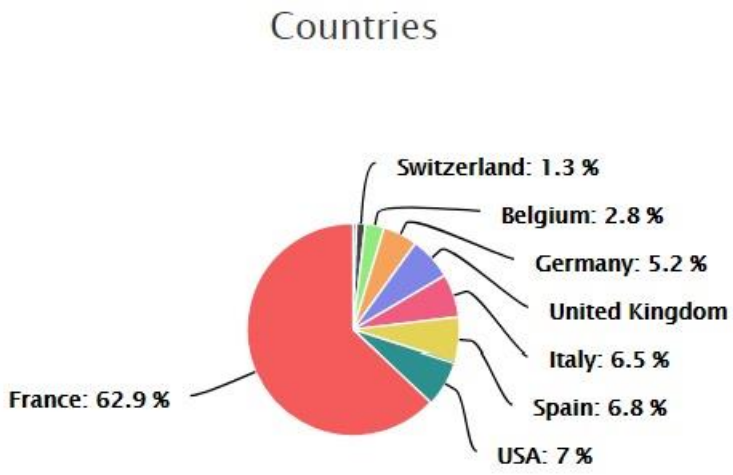


Figure 6. Résultats de la recherche effectuée sur le Community Explorer (mis au point par David Chavalarias). Ce graphe a été produit à partir d'une sélection de pays : USA, France, Suisse, Belgique, Allemagne, Royaume Uni, Italie, Espagne

Chavalarias nous met en garde contre le biais contenu dans son propre logiciel : « ça c'est un artefact, parce qu'en fait, comme on l'a fait en France, c'est normal qu'il y ait un biais »[1770]. En effet, il faut savoir que la base de données se remplit par l'enregistrement autonome des membres de la communauté, sur une initiative propre ou parce qu'on les a sollicités à le faire. Mais si l'on croise cette source avec la base de données du *Web of Science* de Thomson Reuters, nous nous apercevons que le biais correspond tout de même à une réalité : si l'on saisit « complex systems » dans ce moteur de recherche, on découvre que le CNRS est l'institution qui, au niveau mondial, produit le plus d'articles contenant ce mot-clé (fig. 7). Après dix institutions américaines, russes et chinoises, la France réapparaît en douzième place avec Paris Saclay. En même temps, les disciplines les plus présentes dans la fig. 8 – ingénierie et électronique, biochimie et chimie – ne sont pas celles qui reviennent le plus souvent dans les communautés des SSC que nous avons étudiées – celles-ci se penchent le plus souvent sur les humanités numériques, sur la physique, sur l'informatique et sur la biologie. En termes de dates, le saut majeur a lieu entre l'année 1989 et l'année 1990, lorsqu'on passe de 300 à 1000 articles. Encore plus spectaculaire est le saut entre 1990 et 1991, puisque le nombre d'articles publiés passe de 1000 à presque 7000. Cet épiphénomène est très probablement lié à la montée en puissance de la renommée du SFI et du jargon qu'il a mis en place et diffusé. Depuis lors, le taux de publications employant le mot-clé ne cesse d'augmenter, mais de manière graduelle et stable.
Nous avons encore un autre chiffre, tiré du blog de Stephen Wolfram. Avec son équipe éditoriale, il a compté le nombre d'instituts de la complexité qu'il y aurait dans le

[1770] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.

monde : plus d'une soixantaine[1771], distribués sur tous les continents sauf l'Afrique, et avec une concentration particulière aux États-Unis, en Angleterre et en France (fig. 9).

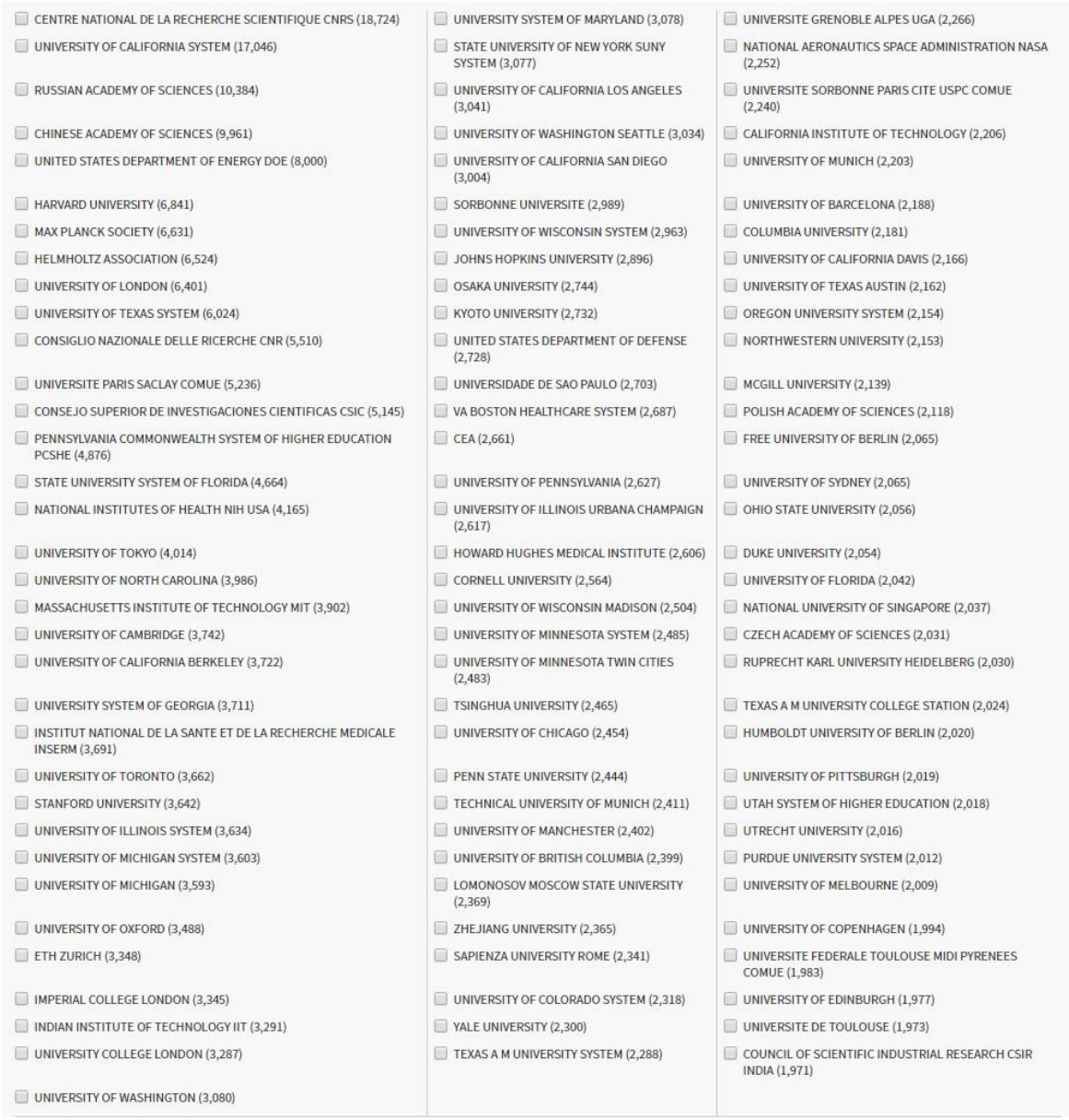


Figure 7. Résultats par le Web of Science de Thompson Reuters des centres de recherche mondiaux qui publient le plus sur les systèmes complexes

Si l'on visionne la fig. 10, toujours produite par Wolfram, l'on s'aperçoit que le lancement franco-européen des SSC, qui arrive au tournant de 2005, correspond à une augmentation du nombre des instituts, mais il est vrai aussi que cela s'inscrit dans un processus d'accélération qui débute dans les années 1980 : l'on passe de quelques

[1771] Le SFI en récolte les lauriers : « Our impact in establishing the scientific study of complex systems as a major and exciting component of the research landscape has been an internationally recognized achievement of the highest order. Among the many accolades testifying to this, perhaps none is more convincing than the plethora of SFI clones that are emerging world-wide ('imitation is the sincerest form of flattery') » : SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007, p. 7.

instituts à plus de dix entre 1980 et 1994 (14 ans), puis on passe de dix à vingt entre 1994 et 2001 (7 ans), puis de vingt à quarante entre 2001 et 2005 (4 ans), enfin de quarante à soixante entre 2005 et 2010 (5 ans). On a l'impression que, après le boom des premières années 2000, la croissance atteint aujourd'hui un plateau.

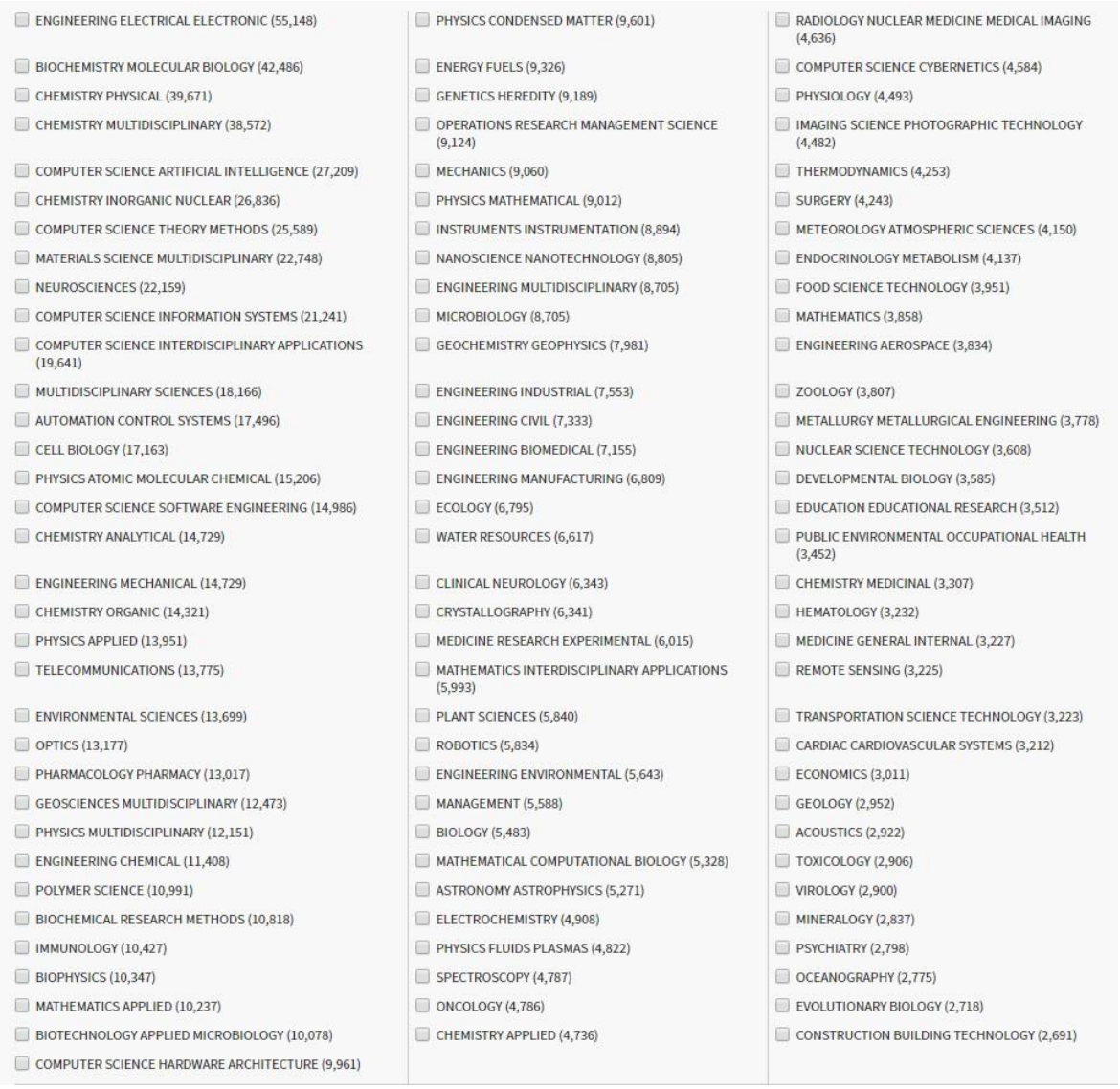


Figure 8. Résultats par le Web of Science de Thompson Reuters des disciplines où l'on retrouve le plus grand nombre d'articles sur les systèmes complexes

Restent quatre données en notre possession qui ne sont pas à négliger pour éclairer le tableau précédent : la réduction ou la disparition des financements européens ou même nationaux fléchés « systèmes complexes » ; l'impression que nombre de nos interviewés ont sur le fait que les SSC ont été éminemment une mode, qui est maintenant en déclin, malgré le succès dans la diffusion du langage de la complexité à tous les niveaux, y compris celui politique[1772] ; la difficulté des SSC d'atteindre un

[1772] Le succès du lobbying des entrepreneurs scientifiques des SSC atteint son apogée entre la fin des années 2000 et les premières années 2010, quand le langage de la complexité résulte omniprésent dans plusieurs

niveau de légitimité face à la communauté scientifique en général[1773] ; et, comme nous l'avons vu dans le Prologue, la présence d'une pluralité de manières d'employer le terme de complexité, en dehors des SSC et des disciplines que ce domaine convoque le plus souvent.



Figure 9. Cartographie des instituts de la complexité présents dans le monde, réalisée par Stephen Wolfram et son équipe. Source : http://blog.stephenwolfram.com/2012/05/its-been-10-years-whats-happened-with-a-new-kind-of-science/

À propos de quelques instituts de la complexité

Quid des autres centres de la complexité ? Nous en avons visité quelques-uns en Europe et aux États-Unis et nous relevons une grande variabilité dans les discours

documents politiques, notamment la Stratégie Nationale de la Recherche et le Contrat d'objectifs entre le CNRS et l'État. Dans ce dernier, on lit par exemple : « Certaines thématiques interdisciplinaires concernant les mathématiques doivent être soutenues dans les années à venir : systèmes complexes ; réseaux et combinatoire : applications sociales, biologiques et technologiques ; biologie systémique ; géométrie discrète, algorithmique, et modélisation géométrique ; logique et complexité (lien avec l'INSHS via linguistique et traitement du langage) ; dynamique non linéaire et applications (instabilités, défauts, patterns) ; probabilités et systèmes dynamiques : interactions avec la mécanique statistique, et physique statistique ; émergence, organisation, innovation et robustesse dans les systèmes naturels ou artificiels ; sécurité et cryptographie » : Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'État, 25 juin 2009, pp. 49-50. Quant à la Stratégie Nationale de Recherche de 2013, il est question de systèmes complexes et de complexité à plusieurs reprises : « Les données recueillies permettront d'améliorer la modélisation des processus, et donc du fonctionnement de ces systèmes complexes et leur réponse à différents scénarios futurs » : MESR, Stratégie Nationale de Recherche de 2013, p. 36.

[1773] Sur le problème de la légitimité, Michel Morvan nous a raconté les difficultés que Bourgine et lui-même rencontrèrent lorsqu'ils lançaient la stratégie multi-échelles au milieu des années 2000. Dans l'extrait qui suit, le physicien reporte la contre-argumentation qu'il rétorquait à ceux et celles qui lui disaient que les SSC rassemblaient des mauvais scientifiques : « Un des reproches qui nous a été fait c'est que : 'Dans la communauté des systèmes complexes, vous agrégez des gens qui ne sont pas bons dans leurs communautés et qui viennent là parce que c'est un moyen quand on n'est pas bon'. J'ai dit c'est vrai mais je m'en fous. Dans toutes les communautés, il y a des gens pas bons, mais ce qui fait une communauté scientifique, c'est les gens bons. Je ne vais pas interdire à untel de venir. Bien sûr, il y aura des choses pas sérieuses. A chaque fois que les gens me disaient ça, je leur disais, 'Toi tu fais de la physique théorique, tu ne vas pas me dire qu'il y a des gens qui sont nuls en physique théorique ?' 'Ben si'. Et je dis, 'Là c'est pareil'. Moi je dis ce qu'il faut c'est montrer qu'il y a des gens qui sont bons dans leurs différents domaines, et respectés » : entretien avec Michel Morvan, 03.10.16.

épistémiques, les modes de fonctionnement et les rapports avec le SFI. Cinq catégories peuvent être identifiées.

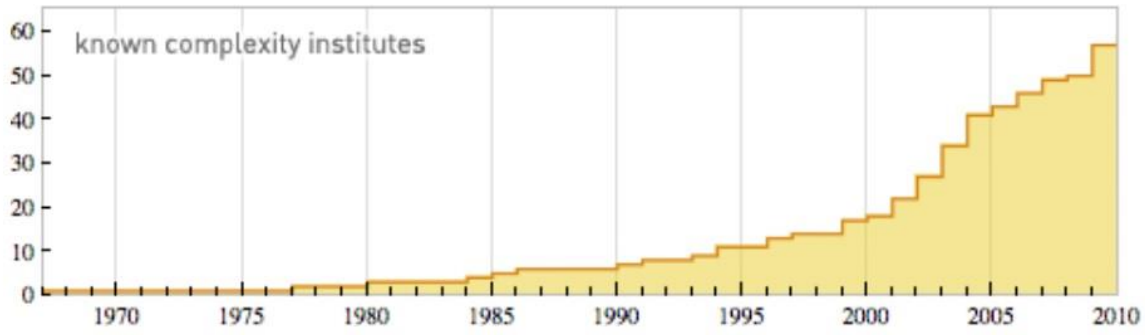


Figure 10. Table temporelle de l'évolution du nombre d'instituts de la complexité dans le monde, réalisée par Stephen Wolfram et son équipe. Source : http://blog.stephenwolfram.com/2012/05/its-been-10-years-whats-happened-with-a-new-kind-of-science/

La première catégorie est celle des centres qui précèdent le SFI et qui, tout en mobilisant la *tradition des systèmes dynamiques*, n'emploient pas tout l'éventail d'outils que le SFI mobilisera, enrôlera ou lancera. C'est le cas du Centre Interdisciplinaire de Phénomènes Non-linéaires et de Systèmes Complexes (ou CENOLI), fondé par Grégoire Nicolis en 1991 autour de la figure d'Ilya Prigogine, à l'Université Libre de Bruxelles. C'est un centre spécialisé dans les domaines des systèmes dynamiques, de la physique statistique et des MBA[1774]. C'est aussi la catégorie du Center for Complex Systems Research, fondé par Stephen Wolfram en 1983 à l'Université de l'Illinois (avant que ce chercheur n'abandonne l'académie pour se dédier à son entreprise). Ce centre était au début spécialisé dans les automates cellulaires et l'étude des systèmes dynamiques.

À la deuxième catégorie appartiennent l'ISC-PIF, l'IXXI et l'Institute for Scientific Interchange de Turin[1775] qui, tout en regardant avec attention et admiration vers le SFI, fondent (ou refondent, dans le cas de l'ISI) des institutions en suivant des canaux de financement et de constitution différents que ceux indiqués par l'archétype américain. Ces centres, en outre, se proposent d'être fortement innovants et originaux dans la proposition de nouvelles techniques, par rapport à la boîte à outils mise au point par le SFI au fil du temps. Sous l'aile du RNSC, des fédérations régionales sur les systèmes complexes et de la European Complex Systems Society se trouvent aussi d'autres centres qui ont été fondés en France à la suite des expériences de l'ISC-PIF et de

[1774] « Dans un grand nombre de disciplines, on s'aperçoit que la même méthodologie s'applique avec succès à la description de phénomènes à première vue très différents. Ce caractère 'générique' des processus non-linéaires permet ainsi de transcender les barrières disciplinaires et d'aborder pour la première fois d'une façon systématique l'étude des systèmes complexes dans un cadre conceptuel unifié et cohérent » : Plaquette de présentation du Cenoli, 1991, archives de Grégoire Nicolis.

[1775] Au début de son histoire, l'ISI était un centre interdisciplinaire, sur le modèle de Princeton, qui acceptait des visiting comme Thomas Kuhn. La complexité est survenue bien plus tard.

l'IXXI : nous pensons notamment à l'Institut des Systèmes Complexes en Normandie[1776] et à l'Institut d'Études des Systèmes Complexes de Toulouse[1777].
Nous avons en troisième lieu des homologues fidèles du SFI, qui interprètent une vision restreinte des SSC, telle qu'elle a été construite par l'ancêtre situé au Nouveau Mexique. Ils suivent, *mutatis mutandis*, le modèle de Santa Fe aussi pour ce qui est des discours et des institutions mis en place. C'est le cas du New England Complex Systems Institute de Cambridge (Massachussetts), dirigé et fondé en 1996 par le physicien Yaneer Bar-Yam[1778]. Institution de recherche, d'éducation et de conseil, le NECSI est spécialisé dans les réseaux, les analyses statistiques et les MBA. Sur le sol européen, le Complex Systems Lab de Barcelone, fondé en 1998, est un autre héritier du SFI [1779]. Rattaché à l'Université Pompeu Fabra, il est dirigé par le physicien Ricard Solé, membre externe de l'institut américain depuis 1997[1780]. Le centre est spécialisé dans la théorie des réseaux et dans le domaine de la vie artificielle, appliqué à la biologie de synthèse.
Il existe ensuite des centres qui connaissent, s'inspirent et font mention du SFI, sans pour autant s'atteler aux caractéristiques épistémiques et institutionnelles de ce dernier. Il s'agit d'instituts qui sont fondés pour des raisons et avec des discours qui s'écartent de ceux qui furent du SFI. Dans cette catégorie rentre le Center for Complex Systems and Dynamics[1781], rattaché à l'Illinois Institute of Technology de Chicago, ainsi que le Northwestern Institute on Complex Systems[1782], rattaché à la Northwestern University de Chicago. Fondé en 2003 et animé par les ingénieurs chimiques Fouad Teymour et Ali Cinar, le premier est un laboratoire qui fait des modélisations par MBA de processus biochimiques ou physico-chimiques pour préparer des expériences de laboratoire ou des productions industrielles[1783]. Le deuxième a été fondé par Julio Ottino en 2004, pour institutionnaliser une série de rencontres interdisciplinaires qui avaient commencées auparavant[1784]. L'analyse des réseaux, des *Big Data* et les MBA sont parmi les outils principaux employés dans les domaines du droit, de l'ingénieur, de la médecine, de l'entreprise, etc.
Nous avons ensuite la catégorie des centres qui adoptent le terme de système complexes moins par adhésion au modèle de l'ancêtre américain, que pour des raisons de convenance institutionnelle, les systèmes complexes y étant perçus comme un chapeau efficace pour fédérer des équipes hétérogènes et multidisciplinaires. C'est le

[1776] Site officiel de l'ISCN : https://iscn.univ-lehavre.fr.
[1777] Site officiel de l'XSYS de Toulouse : http://xsys.fr.
[1778] Site officiel du NECSI : http://necsi.edu.
[1779] Site officiel du CSL : http://complex.upf.edu.
[1780] Entretien avec Ricard Solé, 16.06.15 ; entretien avec Ricard Solé, 29.02.16.
[1781] Site officiel du CCSD : https://web.iit.edu/ccsd.
[1782] Site officiel du NICO : https://www.nico.northwestern.edu.
[1783] Entretien avec Fouad Teymour et Ali Cinar, 16.09.16.
[1784] Entretien avec Julio Ottino, 16.09.16.

cas du Département Systèmes Complexes du Laboratoire d'Informatique de Paris 6[1785] et du Namur Institute for Complex Systems de l'Université de Namur[1786], en Belgique. L'IXXI, lors de sa fondation, appartient à la deuxième catégorie décrite ici, mais, depuis le départ de Morvan, il relève, comme le montrent les témoignages de Jensen et Beslon cités plus haut, de cette cinquième typologie.

Enfin, il existe un certain nombre de centres de recherche sur les systèmes complexes, qui ne font pas référence au SFI, souvent méconnu ou ignoré par leurs membres. Le Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems de Dresde[1787] ou le Laboratoire Matière et Systèmes Complexes de Paris Diderot[1788] relèvent de cette catégorie. Dans ces centres publics, la référence à la complexité puise surtout de la physique statistique et de la physique de la matière condensée, où le terme est en usage depuis fort longtemps, bien que de manière non-programmatique.

Résumons en quelques points les données reportées dans ce chapitre ainsi que dans les précédents. Les SSC :

- sont un domaine de recherche présenté au début comme une nouvelle discipline et qui finit par être décrit aujourd'hui comme une « façon de voir les choses » par ses représentants ;
- ont des financements fluctuants, aujourd'hui plutôt en déclin ;
- se composent de scientifiques parfois engagés, parfois « timides » ;
- se concrétisent en des instituts qui sont quelques fois alignés à une définition précise de systèmes complexes et qui d'autres fois se retrouvent dans le besoin d'une formule commode qui puisse fédérer des sous-équipes hétérogènes ;
- se dotent d'outils et de méthodes provenant d'autres disciplines et ne possède pas une méthodologie définie et partagée par tous ses représentants ;
- possèdent des revues scientifiques spécialisées qui ne sont pas jugées suffisamment prestigieuses par la communauté des scientifiques revendiquant l'étude des systèmes complexes.

Devant un tel tableau, que peut-on dire sur le statut social et épistémique des SSC ? Sommes-nous face à une discipline encore en formation ? Ou à un effet de mode, qui s'est temporairement produit par la conjonction de la volonté de quelques entrepreneurs scientifiques militants et de la nécessité de financements de la part de scientifiques de tous bords, dans le contexte d'une économie de la rareté ? Ou bien à un domaine interdisciplinaire aux contours et aux règles internes flous ? Un regard à la littérature historiographique et sociologique sur les disciplines scientifiques et les domaines émergents peut nous aider à trouver des éléments de réponse à ces questions.

[1785] Site du département systèmes complexes du LIP6 : https://www.lip6.fr/recherche/team.php?acronyme=SysComp.
[1786] Site officiel du NAXYS : http://www.naxys.be.
[1787] Site du Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems : https://www.pks.mpg.de/institute/.
[1788] Site du Laboratoire Matière et Systèmes Complexes de Paris Diderot : http://www.msc.univ-paris-diderot.fr.

Comment qualifier le domaine émergent des SSC ?

Nous n'allons pas proposer une revue de la littérature exhaustive des travaux sur les disciplines et les domaines émergents, d'autant plus que d'autres plus complètes et structurées existent déjà[1789]. On va plutôt proposer une mise en perspective critique d'un certain nombre de textes, pour montrer les éléments de réflexion qu'ils suggèrent et pour en relever les contradictions et les limites à partir du cas d'étude des SSC. On peut dire d'emblée que nous refusons toute essentialisation de ce domaine, tout en proposant un terme pour le saisir. Il ne s'agit pas de le figer dans un concept réifiant et atemporel, qui ne tient pas compte de l'avis des protagonistes ni des changements historiques qu'il traverse, mais de décrire précisément sa nature lâche, processuelle, indéfinie et précaire.

Limites de la littérature

L'un des premiers textes dédiés à la description de l'émergence d'un domaine scientifique est celui de Nicholas Mullins, déjà discuté dans le chapitre sur le SFI[1790]. De texte similaires qui prennent en considération à la fois les éléments cognitifs et sociaux de l'émergence d'un domaine il y en a bien d'autres plus tardifs, par exemple celui du sociologue Michel Dubois sur la naissance de la sociologie des sciences, décrite à partir de la correspondance de Robert Merton[1791]. Dubois repère cinq éléments successifs ou parallèles dans le processus de mise en place d'un programme disciplinaire : 1) s'établir sur le marché académique, en faisant carrière et en établissant sa propre influence ; 2) se différencier des disciplines préexistantes ou proches, par un travail de démarcation ; 3) créer et diriger des instruments disciplinaires, comme les revues, les sociétés savantes et les centres de recherche ; 4) former et recruter des étudiants ; 5) produire, enfin, un récit de l'identité disciplinaire, ce que, à la suite de Wolf Feuerhahn, nous avons appelé *histoire indigène*[1792]. À la suite de l'historien et philosophe des sciences Timothy Lenoir, auteur d'un texte

[1789] Klein, G., « L'aventure des disciplines : trois thèses dans les études de la science contemporaine », *Cahiers Internationaux de Sociologie*, 2000, vol. 109, pp. 393-414 ; Sugimoto, C.R. & Weingart, S., « The Kaleidoscope of Disciplinarity », *Journal of Documentation*, 2015, vol. 71, n. 4, pp. 775-794. Sugimoto et Weingart proposent une revue de la littérature qui, malgré son incomplétude assumée, donne les vertiges pour l'énorme variabilité qui existe dans l'usage des termes relatifs à l'étude des disciplines. Gilles Klein, pour sa part, fait une revue de la littérature plus structurée, condensée en trois approches : les disciplines comme espaces d'argumentation et de consensus théoriques ; les disciplines comme processus d'institutionnalisation de nouveaux domaines du savoir ; et les disciplines comme l'expression d'intérêts sociétaux.

[1790] D'autres auteurs ont reparcouru l'histoire racontée par Mullins avec d'autres approches : Abir-Am, P.G., *The Double Helix : A Historical Analysis of Uniqueness in a Transdisciplinary Discovery*. Jerusalem, The Hebrew University, 1975 ; Kay, L.E., *The Molecular Vision of Life : Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*, New York, Oxford University Press, 1993.

[1791] Dubois, M., « 'Private knowledge' et 'programme disciplinaire' en sciences sociales : étude de cas à partir de la correspondance de Robert K. Merton », *L'Année sociologique*, 2014, vol. 64, n. 1, pp. 79-119.

[1792] Feuerhahn, W., « Instituer les neurosciences sociales », *op. cit.*

classique sur l'étude des disciplines attentif aux dynamiques institutionnelles[1793], Dubois définit le programme disciplinaire comme « l'ensemble des actions, individuelles et collectives, orientées en finalité vers la formation des composantes sociales de l'identité disciplinaire »[1794]. Le sociologue en outre décrit le « programme disciplinaire » comme analytiquement distinct du « programme de recherche », car ce dernier est orienté vers la dimension cognitive, tandis que le premier est orienté vers la dimension sociale.

Cette séparation entre le volet cognitif et le volet social est la même que l'on retrouve dans un autre classique sur le sujet. L'ouvrage collectif *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, édité par Gérard Lemaine, Roy MacLeod, Michael Mulkay et Peter Weingart, constitue l'une des références incontournables de la sociologie des disciplines scientifiques[1795]. Paru en 1976, ce texte souligne la complexité du phénomène de l'émergence d'un nouveau champ, en se proposant de dépasser le dualisme internalisme-externalisme mertonien qui, selon ces auteurs, aurait opposé respectivement historiens et sociologues des sciences pendant longtemps. À la suite d'un article classique, à savoir *Social Factors in the Origins of a New Science : The Case of Psychology* de Joseph Ben-David et Randall Collins[1796], les coordinateurs de l'ouvrage prônent, dans l'introduction, une méthode qui tienne compte des deux catégories d'aspects : les aspects cognitifs (questions, théories, objets de recherche, méthodes de recherche) et les aspects sociaux (organisation sociale entre scientifiques, contexte sociohistorique plus large, raisons économiques). Ce texte se propose donc de ne pas négliger les entrelacements des interactions entre ces éléments, tout en séparant *de jure* et *de facto* l'interne de l'externe, le cognitif du social, l'épistémique du politique[1797].

Si l'on analyse ensuite quelques-uns des chapitres contenus dans le livre de Lemaine et ses collègues, on s'aperçoit que – exception faite pour la contribution de Jacques de Certaines, qui propose d'abandonner tout court le concept de discipline[1798] – la description de la formation des domaines scientifiques suit une certaine logique linéaire, une téléologie. Dans ces travaux, les disciplines sont faites d'objets d'étude, de communautés, de méthodes et de bornes précis et stables – une fois établis. En outre, l'élément de la formation pédagogique et du recrutement au nom de la discipline résulte un critère discriminant. Par exemple, à partir du cas de la chimie physique,

---

[1793] Lenoir, T., *Instituting Science. The Cultural Production of Scientific Disciplines*, Stanford, Stanford University Press, 1997.

[1794] Dubois, M., « 'Private knowledge' et 'programme disciplinaire' en sciences sociales », *op. cit.*, p. 84.

[1795] Lemaine, G., et al., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, *op. cit.*

[1796] Ben-David, J. & Collins, R., « Social Factors in the Origins of a New Science : The Case of Psychology », *American Sociological Review*, 1966, vol. 31, n. 4, pp. 451-465.

[1797] Les éditeurs écrivent en effet : « In our view, [no text] of those contained either in this volume or elsewhere, demonstrate unequivocally the effect of social influences on the content of scientific thought » : Lemaine, G. et al., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, *op. cit.*, p. 15.

[1798] de Certaines, J.D., « La Biophysique en France : Critique de la Notion de Discipline Scientifique », dans Lemaine, G. et al., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, *op. cit.*, p. 114.

R.G.A. Dolby conclut qu'une discipline se constitue à partir de l'apparition de nouvelles idées et techniques à la périphérie des domaines établis ; de la formation de groupuscules qui intègrent des nouveaux adeptes, notamment des étudiants ; de la diffusion géographique des nouvelles idées et méthodes ; et de l'institutionnalisation qui la rend une science à part[1799]. Ce schéma ne diffère guère du chapitre le plus connu et cité de l'ouvrage en question : *Cognitive, Technical and Social Factors in the Growth of Radio Astronomy* de Mulkay et Edge. Selon ces auteurs, la naissance d'une discipline passe par l'identification d'une série de problèmes théoriques irrésolus ; par la disponibilité technique et théorique pour les résoudre ; et par la formation d'un groupe de chercheurs et chercheuses intéressés par l'application de ces méthodes aux questions encore ouvertes[1800]. Maintenant, au-delà de leur posture théorique que nous jugeons problématique, ces travaux ne nous fournissent pas d'outils pour rendre compte des sciences de la complexité. Une des choses qu'il est possible d'en déduire, c'est que, selon ces critères, le domaine lancé par le SFI est difficilement descriptible comme une discipline.

Si l'on prend en compte un autre article important sur la sociologie des disciplines, à savoir *L'institutionnalisation de la recherche en milieu universitaire et ses effets* du sociologue des sciences bourdieusien Yves Gingras[1801], l'on est doté d'une définition claire. Pour ce chercheur, une discipline se caractérise par trois éléments : l'émergence d'une nouvelle pratique, l'institutionnalisation de cette pratique et la formation d'une identité sociale[1802]. Courte et opérationnelle, cette définition appelle toutefois à une série de considérations critiques. En premier lieu, selon cette définition les SSC pourraient être définies comme une discipline. Nonobstant, les représentants de ce domaine et ses observateurs tombent en général d'accord sur le fait que la qualification de science à part entière est inapplicable aux SSC. Donc il y a apparemment un paradoxe. Cependant, tout est question de définitions, donc un domaine socio-épistémique peut être défini comme une discipline ou pas, selon les critères que l'on choisit : par exemple, Monneau et Lebaron qualifient la neuroéconomie de discipline, même s'il n'y a pas de diplômes ou de départements qui y sont dédiés[1803]. En suivant Gingras, nous avons des nouvelles pratiques (réseaux, MBA, etc.), des institutions (centres de recherche, sociétés savantes, etc.), ainsi qu'une identité sociale (militants, plate-formistes, etc.). Ce trio échoue tout de même à saisir la spécificité des SSC, du

[1799] Dolby, R.G.A., « The Case of Physical Chemistry », dans Lemaine, G. et al., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, *op. cit.*, p. 67.

[1800] Mulkay, M.J. & Edge, D.O., « Cognitive, Technical and Social Factors in the Growth of Radio Astronomy », dans Lemaine, G. et al., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, *op. cit.*, p. 156.

[1801] Gingras, Y., « L'institutionnalisation de la recherche en milieu universitaire et ses effets », *Sociologie et sociétés*, 1991, vol. XXIII, n. 1, pp. 41-54.

[1802] Dans un article plus récent, la définition reste la même : Prud'homme, J. & Gingras, Y., « Les collaborations interdisciplinaires : raisons et obstacles », *Actes de la recherche en sciences sociales*, 2015, vol. 5, n. 210, pp. 40-49.

[1803] Monneau, E. & Lebaron, F., « L'émergence de la neuroéconomie : Genèse et structure d'un sous-champ disciplinaire », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 2011/2 (n° 25), pp. 203-238.

fait de leur variabilité théorique, sociale et institutionnelle. En deuxième lieu, on pourrait se demander si les SSC constituent un champ au sens bourdieusien : un champ est un espace autonome, avec ses règles et ses conflits internes, où les individus désirent accumuler un capital spécifique. Les SSC ne possèdent pas une autonomie institutionnelle, économique et sociale suffisante ; les rapports de force se jouent le plus souvent dans les disciplines établies ; enfin, nous ne relevons pas l'existence d'un capital spécifique, ni de positions stables à conquérir au nom pur et simple des systèmes complexes. L'on observe plutôt un noyau dur de *militants*, de *plate-formistes* et de *crypto-complexologues* qui se soudent stratégiquement afin d'obtenir de la reconnaissance, individuelle et collective – signe précisément que le champ n'en est pas un. En troisième lieu, Gingras connecte le statut de discipline à l'aspect professionnel. Certes, nous savons, grâce à notre terrain, de certains informaticiens ayant été embauchés par des entreprises en tant que *complex systems scientists/analysts*, tout comme il y en a qui sont embauchés en tant que *Big Data scientists/analysts*. Lorsque toutefois ces mêmes informaticiens candidatent pour un poste dans l'académie, que cela soit dans les universités ou dans les instituts de recherche, aucun d'entre eux ne sera embauché sous l'étiquette de « scientifique des systèmes complexes », mais toujours sous celle d'informaticien, de mathématicien, d'économiste ou autre. Déjà Cowan mettait en garde les membres du SFI, surtout les plus jeunes, contre le fait de se limiter à devenir des généralistes ; il conseillait donc de bien maîtriser également au moins une discipline traditionnelle[1804]. Geoffrey West dira la même chose vingt ans plus tard lorsqu'il sera président du SFI. Bourgine et Morvan imaginaient la science de la complexité comme une méta-science qui traverse les autres, lesquelles doivent rester en jeu et même se multiplier (en sens vertical : biologie intégrative, neurologie intégrative, économie intégrative, etc.). Nombreux travaux ont, par ailleurs, montré la difficulté que les jeunes doctorants et postdoctorants, ayant conduit des recherches interdisciplinaires, rencontrent dans la suite de leur parcours, lorsqu'ils ou elles doivent trouver un poste ou justifier leurs recherches face à des jurys. Nous avons nous-même recueilli des témoignages à l'égard de ce problème :

> « Mon affectation principale c'est Géographie, avec 50% affecté [à l'ISC-PIF]. Puisque je ne rentre pas trop dans la case des informaticiens, si je discutais avec des informaticiens, ce que je fais ça peut leur paraître un peu facile. Et si je parle avec des géographes, ça tient pas la route. Tous les deux ans il faut que je produise un rapport où il faut que je me positionne par rapport à la section 39 [du CNRS : Espaces, territoires et sociétés]. La dernière fois, vu que j'ai plein de publis, ils m'ont donné un bon avis, mais on m'a quand même dit que peut-être il faudrait réfléchir un peu à la manière de me positionner. Si on m'envoie chez les

[1804] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 2.

informaticiens c'est pareil. À la fois c'est cool parce que je fais ce que je veux, à la fois j'ai quand même un peu d'inquiétude »[1805].

Le biophysicien Joachim Krug relate que, en Allemagne, il existe une section de la société nationale de physique dédiée à l'étude quantitative des systèmes sociaux. Elle semble jouir d'un énorme succès, mais les représentants de cette section, jeunes ou âgés qu'ils soient, ont selon lui du mal à trouver des postes dans l'académie :

« One thing that does exist in Germany and it's quite visible community, it's a section of the German physical society, DPG : they have a section on socioeconomic systems. […] In Germany we say that a lot of these people have a lot of trouble in getting faculty positions. This community exists, but academically not well established. […] They are very attractive, they are very popular »[1806].

Malgré l'éloge quasi unanime de l'interdisciplinarité, elle ne paie pas forcément dans la carrière d'un scientifique. L'initiative de l'ISC-PIF, qui confère un prix à la meilleure thèse qui « a pour objectif de mettre à l'honneur la recherche dans le domaine des systèmes complexes »[1807], ou celle de l'ISI, qui confère le prix Lagrange aux chercheurs et chercheuses de moins de 50 ans ayant produit des « accomplissements » dans le domaine des sciences de la complexité[1808], ne semblent pas suffisantes pour renverser une telle tendance.
De nombreux articles des *science studies* sur les disciplines scientifiques s'accordent sur le fait que les frontières disciplinaires évoluent constamment et que l'échelle pertinente pour les étudier réside plutôt dans l'« infra-disciplinaire », comme le dit Pierre Favre[1809]. Michel Leclerc défend, quant à lui, l'idée selon laquelle le focus devrait se faire sur les spécialités, qui selon lui fragmentent et différencient les disciplines[1810]. En raison de cela, il souscrit le concept de « forme disciplinaire » proposé par Alberto Cambrosio et Peter Keating[1811], car cela permet de reconnaître les contenus éphémères des disciplines et les reconfigurations constantes auxquelles elles font face. Un synonyme de spécialité est sous-discipline : par exemple la génétique est une spécialité/sous-discipline de la biologie. À la lumière de cela, on pourra dire que le domaine des « réseaux complexes » peut être considéré comme une nouvelle spécialité

[1805] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1806] Entretien avec Joachim Krug, 18.11.15.
[1807] Page dédiée au prix de thèse en systèmes complexes de 2018 sur le site officiel de l'ISC-PIF : https://iscpif.fr/prix-de-these-2018/.
[1808] Page Wikipédia sur le prix Lagrange conféré par l'ISI : https://en.wikipedia.org/wiki/Lagrange_Prize.
[1809] Favre, P., « Retour à la question de l'objet », *op. cit.*
[1810] Leclerc, M., « La notion de discipline scientifique », *op. cit.*
[1811] Cambrosio, A. & Keating, P., « The disciplinary Stake : the Case of Chronobiology », *Social Studies of Science*, 1983, vol. 14, pp. 323-353.

au sein de la physique statistique ou des statistiques[1812]. Depuis une vingtaine d'années, ce champ trouve en effet de plus en plus d'espace dans l'académie, non seulement dans des conférences et dans des revues, mais aussi dans cours universitaires et des manuels. Mais les SSC, qui se veulent pluri- et interdisciplinaires, ouvertes à toute nouvelle discipline qui veuille les rejoindre et à toute nouvelle approche qu'on puisse y intégrer, se posent d'emblée à un niveau différent de celui d'une spécialité afférente à une discipline établie.

Est-ce que l'article de Scott Frickel sur l'interdiscipline peut nous aider davantage[1813] ? Le sociologue américain définit une interdiscipline comme un champ où deux ou plusieurs savoirs s'hybrident grâce à des frontières organisationnelles, épistémologiques et politiques délibérément rendues poreuses jusqu'à l'établissement du nouveau domaine. Une telle description peut rappeler ce que Krakauer ou Bourgine appellent « transcience » ou « transdiscipline ». C'est-à-dire deux ou plusieurs galaxies qui viennent se fusionner dans une nouvelle galaxie. Donc l'interdiscipline relate de la rencontre entre des scientifiques hétérogènes qui aboutissent à une nouvelle unité qui donne sens à ce qu'ils font, en déterminant comment et pourquoi ils le font. Les SSC manquent d'une telle homogénéité cognitive, pratique et politique.

Or, même si ces travaux ne semblent pas suffire à saisir les SSC avec précision, ils nous aident à prendre mieux conscience des caractéristiques qui constituent (ou pas) ce domaine. Deux articles, parmi d'autres, mettent l'accent sur un autre aspect important : l'éducation. Le premier, qui est une introduction à un numéro thématique de la *Revue d'anthropologie des connaissances*, propose un état de l'art avec des textes qui mettent au jour l'importance des universités dans la naissance des disciplines, en considérant « la mission d'enseignement [comme] une condition essentielle » pour leur apparition et stabilisation[1814]. Kate Bulpin et Susan Molyneux-Hodgson, en revanche, suivent Michel Foucault pour entendre les disciplines scientifiques comme des dispositifs qui *disciplinent* les membres de la communauté[1815]. Ces auteures prennent le cas d'un concours qui, en biologie synthétique, a été utilisé par les fondateurs du domaine pour socialiser et discipliner les jeunes étudiants aux pratiques et aux idéologies du groupe. Or, un doctorat en « systèmes complexes » existe à l'Open University, où est basé Jeffrey Johnson, en Angleterre. On a vu que les DIM ont permis à des doctorats en « systèmes complexes » d'être réalisés en France ; on a vu que l'ISC-PIF et l'ISI confèrent des prix aux meilleurs recherches en « systèmes complexes ». Un master a existé à Polytechnique, un autre est géré par l'IXXI : d'autres existent dans plusieurs

[1812] Krug illustre la multiappartenance de certains outils ou domaines de recherche : « I would say cellular automata, networks, this is all part of statistic physics. Of course it's also part of other disciplines as well. There are people in computer science doing cellular automata. It's all interrelated » : entretien avec Joachim Krug, 18.11.15.

[1813] Frickel, S., « Building an Interdiscipline », *op. cit.*

[1814] Monteil, L. & Romerio, A., « Des disciplines aux 'studies'. Savoirs, trajectoires, politiques », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2017, vol. 11, n. 3, pp. 231-244.

[1815] Bulpin, K. & Molyneux-Hodgson, S., « The disciplining of scientific communities », *op. cit.*

pays. Des cours sur les systèmes complexes sont impartis dans les facultés de physique de quelques universités dans plusieurs pays ; parfois les systèmes complexes sont enseignés aussi en informatique ou en sciences cognitives ; rarement en sociologie ou en biologie (des systèmes). Les écoles d'été du SFI continuent d'exister et de faire des adeptes, de même que font des écoles semblables organisées par d'autres institutions (Wolfram Corporation, ISC-PIF, etc.). Ce qui est intéressant, c'est de voir la variété de contenu dans ces enseignements : le SFI tâchera d'apprendre à ses participants surtout les mathématiques des systèmes dynamiques, les réseaux et les MBA ; Wolfram se concentrera sur les automates cellulaires ; dans le master de Polytechnique, des mathématiciens proches mais non pas adeptes des SSC enseignaient des neurosciences ; tandis que souvent, dans les facultés de physique, sous l'étiquette de « systèmes complexes » l'on apprend uniquement la physique statistique et l'analyse des réseaux. La présence de multiples dispositifs pédagogiques, dans plusieurs pays, peut faire pencher vers le concept de discipline. En même temps, l'extrême variabilité des contenus enseignés et le manque de standardisation semble éloigner les SSC de la catégorie.

Dans la littérature sur les disciplines scientifiques[1816], l'important souvent n'est pas la taille ni l'homogénéité absolue : s'il existe un collectif et une forme d'institutionnalisation, quelle qu'elle soit, on peut considérer qu'il y une réalité sociale, même si le contenu cognitif est assez variable. Toutefois le concept de discipline tend, tous les auteurs confondus, à considérer ces groupes de scientifiques comme soudés, autonomes et capables de se reproduire. Partant nous nous demandons : et si ces doctorants-là, ayant reçu une bourse DIM ou un prix de l'ISC-PIF, ne peuvent pas utiliser cet élément à lui seul pour trouver un poste dans la suite, est-ce qu'on peut considérer qu'il y a reproduction, autonomie et unité sociale ? Nous en doutons. Les doctorants, les postdoctorants et les chercheurs et chercheuses affirmés, quel que soit leur domaine, n'affichent que rarement les SSC en premier plan pour qualifier leur identité ou leur métier face aux autres – y compris à d'autres représentants du domaine de la complexité. En tout cas ils ou elles ne s'affichent jamais seulement sous cette étiquette-là. Le label « informaticien », « physicien », « biologiste », « sociologue », « géographe », « économiste » est toujours présent avec, et très souvent avant, celle de « scientifique des systèmes complexes ». Nous avons même vu qu'il y a certains membres de la communauté qui préfèrent ne pas le montrer ailleurs que dans les espaces amis. Certes, en géographie ou en physique aussi, on enseigne des contenus assez différents selon les pays, les universités, les cours et les courants dans lesquels s'inscrivent les professeurs. Mais dans le cas des sciences de la complexité, cette variabilité est plus grande encore : il existe très peu de standards, très peu de dispositifs centralisateurs globalement reconnus, très peu de manuels qui

[1816] Laquelle contient parfois des textes qui ne sont pas pertinents pour nous, même en négatif, comme le livre d'Andrew Abbott, *Chaos of disciplines*, Chicago, University of Chicago Press, 2001 : avec une approche physicaliste, le sociologue y compare la multiplication des disciplines à un processus fractal…

fassent consensus. Donc, même sous un tel critère, ce domaine semble échapper à la définition de discipline.

Maintenant, si l'on ne veut pas se pousser jusqu'à la position radicale qui est celle de l'abandon du concept même de discipline[1817], l'on doit au moins faire un constat. À savoir que, indépendamment de la version de « discipline » que nous pouvons choisir dans le répertoire fourni ci-dessus, aucun d'entre ces textes ne semble décrire de manière satisfaisante l'objet particulier que sont les SSC.

Les plateformes méta-disciplinaires

Au SFI est en vigueur le proverbe pragmatique selon lequel « On reconnait un système complexe quand on le voit ». Pour un sociologue des sciences, cette définition minimaliste et sémantiquement vacante est bien insuffisante. Pour saisir la nature des SSC, nous proposons le terme de *plateforme méta-disciplinaire*. « Plateforme », parce que ce domaine est utilisé, par ceux et celles qui s'y inscrivent, comme un appui institutionnel, financier et de légitimité scientifique. « Méta-disciplinaire » pour deux raisons : d'abord parce que les disciplines convoquées sont tellement nombreuses et hétérogènes que ce qui les rassemble ne peut que se retrouver au-delà de chacune d'elles ; ensuite parce que ce quelque chose – notamment un discours épistémologique, une vision métaphysique et un ensemble d'outils d'enquête – doit être suffisamment lâche, flexible et inclusif pour inclure aussi bien la physique que l'écologie, tant la biologie que la sociologie, à la fois l'archéologie et l'économie.

Sorte de confédérations, où chaque « nation » disciplinaire garde son autonomie tout en s'alliant avec d'autres qu'elle reconnaît comme autonomes, les *plateformes méta-disciplinaires* ont la finalité de permettre à des scientifiques hétérogènes de se rencontrer et de collaborer, pour produire des connaissances nouvelles et pour atteindre des objectifs sociaux et institutionnels. Il s'agit de carrefours ou de points de rencontre entre disciplines différentes, lesquelles trouvent un terrain d'entente épistémique, instrumental et institutionnel dans une définition et dans une ontologie de leurs objets d'études, qui sont partagées de par leur indétermination. Les membres de ces carrefours partagent une série de lieux, tels que des instituts, des conférences ou des sociétés savantes, où ils peuvent discuter, collaborer, échanger et concevoir des stratégies pour s'élargir ou pour survivre.

D'un point de vue épistémique, ce qui les lie n'est pas très bien défini et consensuel : ce domaine se caractérise, bien plus que d'autres, par une « fragile cohérence »[1818]. L'aspect multidisciplinaire de ces carrefours devient méta-disciplinaire en ce qui est utilisé comme ciment pour maintenir ensemble des scientifiques divers. D'abord, les objets d'étude portent une définition assez vaste pour inclure des objets d'étude spécifiques très variés. Un système complexe peut aller d'une cellule à une

[1817] Fabiani, J.-L., « Du chaos des disciplines à la fin de l'ordre disciplinaire ? », *Pratiques*, n. 153-154, pp. 129-140.

[1818] Schut, P.-O. et Delalandre, M., « L'échec d'une discipline », *op. cit.*, p. 84.

fourmilière, d'une population de macaques à une épidémie, d'un réseau social à la bourse de New York. Dans une telle intersection, les scientifiques partagent une définition de leur objet d'étude qui n'est pas directement opérationnelle, mais suffisamment commune pour justifier leur coprésence dans un même endroit (projet, institut ou autre) ; elle sert aussi à faciliter l'enrôlement de nouveaux sujets : « comme monsieur Jourdain dans la fameuse pièce de théâtre de Molière, [qui fait] de la prose sans le savoir […] c'est un peu pareil dans la communauté scientifique : il y en a beaucoup qui font systèmes complexes […] sans le savoir »[1819]. Les représentants de ce domaine parlent-ils de complexité ou de systèmes complexes au quotidien ? Non, ils parlent des leurs objets disciplinaires spécifiques. Ils nomment la complexité de temps à autre entre eux selon sa signification la plus générale, mais ils l'agitent sensiblement dans les moments fédérateurs, lors de la captation de financements et dans l'*outreach*. Ce n'est pas un hasard si les sciences de la complexité se caractérisent par le fait que les fondateurs se retrouvent à plusieurs reprises, de part et d'autre de l'Atlantique, à organiser des séances de *brainstorming* pour établir l'objet et les frontières de leur domaine. Que l'on pense aux repas des *Senior Fellows* du SFI au LANL, ou aux rencontres de Cargèse ayant mené aux feuilles de route françaises, ou encore aux ateliers organisés à l'IXXI pour « penser » la complexité[1820]. En deuxième lieu, le discours militant que les membres de cette *plateforme* partagent est lui aussi étendu et malléable. Les SSC offrent une posture intellectuelle antiréductionniste, anti-newtonienne, computationnelle et/ou physicaliste, quantitativiste et multifactorielle. L'holisme y est poursuivi comme étant une nouveauté plus performante, notamment dans le cas de l'étude des systèmes qui sont imprédictibles quand on se limite à les étudier au niveau microscopique.

D'un point de vue institutionnel, ce que la *plateforme* des SSC permet à ses membres, c'est d'utiliser des espaces tiers comme tremplin pour mener des luttes dans les champs respectifs. Le terme de *plateforme* ne se réfère pas qu'au fait, certes important, qu'il s'agit d'un espace de rencontre entre cultures épistémiques différentes. Il se réfère aussi au fait que chaque scientifique s'inscrivant dans les SSC le fait toujours en deuxième, troisième ou quatrième position par rapport à sa ou à ses étiquettes principales : « J'ai l'impression, dit la géographe quantitativiste Clémentine Cottineau, que c'est un peu un totem pour se retrouver sur des sujets très divers lors de conférences […] je me sens pas plus système complexe que géographe »[1821]. Seulement quand il faut faire des institutions, des conférences ou chercher des financements où l'emploi de l'étiquette « SSC » résulte intéressant, alors elle est utilisée au premier plan. Autrement dit, les chercheurs et chercheuses des sciences de la complexité, dans leur *travail de démarcation* quotidien, seront prêts tant à

[1819] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
[1820] Bertin, É. et al., « Les complexités : point de vue d'un institut des systèmes complexes », *op. cit.*
[1821] Entretien avec Clémentine Cottineau, 12.04.17.

invisibiliser l'étiquette « systèmes complexes » qu'à la mettre en avant comme point d'appui stratégique, selon les cas.
Pour certains de ses membres, ce domaine représente un aiguillon ou un prétexte pour mettre en cause les courants dominants dans leurs disciplines de départ. Cela dans le but de « révolutionner » ou au moins d'« innover » une partie de leur discipline d'appartenance, où ils se trouvent parfois à être marginaux. Ces scientifiques cherchent alors des alliés, à la fois à l'intérieur de leur discipline ou en dehors d'elle, pour faire en sorte que leurs efforts soient légitimés, ou pour se nourrir de nouvelles méthodes, de nouveaux discours. C'est aussi pour cela que les SSC ne peuvent pas être considérées comme un champ, avec des luttes internes et des capitaux propres : la compétition y est assoupie, car la priorité c'est de se souder pour mener des luttes communes, soit contre l'« inertie disciplinaire » des institutions de recherche, soit contre leurs collègues les plus proches dans leurs institutions de rattachement principal. Par exemple, Denise Pumain trouve dans les SSC d'abord un vase de Pandore où puiser conceptuellement, méthodologiquement et techniquement :

> « Pour moi la discussion avec les autres sciences des systèmes complexes me permet de me poser des questions dans des termes ou je les aurais pas formulés, ou d'utiliser des instruments que je n'aurais pas su manipuler moi-même, mais qui peuvent apporter à un moment donné une capacité de raisonnement, une capacité instrumentale, une capacité de calcul auxquelles je n'aurais pas pensé »[1822].

Les SSC représentent ensuite, pour Pumain, une manière de renouveler la géographie, en enrichissant et en fortifiant le courant de la géographie quantitative qu'elle a contribué à lancer ; ce qui lui apporte à la fois des résistances et des enthousiasmes :

> « Il y a toujours de la part de certains une résistance vis-à-vis de la nouveauté. Moi j'ai surtout rencontré de l'enthousiasme de la part des jeunes chercheurs qui se sont lancés là-dedans. Il y a un groupe européen qui s'y intéresse depuis longtemps, le groupe de géographes théoriques et quantitatifs […] On a un peu progressé avec tous ces gens-là depuis quand même pas mal d'années, depuis trente ans »[1823].

Quel genre de résistances rencontre-t-elle ?

> « Il y a résistance face à la nouveauté, il y a résistance face à l'apprentissage, qui est quand même lent et un peu loin des formations habituelles des géographes qui sont plutôt littéraires. Il y a la crainte de la perte ou de la négligence du libre arbitre […] argument qui est souvent mis en avant. Il y a une crainte épistémologique de

[1822] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[1823] *Ibid.*

naturalisation des sciences humaines et sociales, qui en ferait perdre les dimensions politiques, voire critiques, alors que bon, vous avez suffisamment fréquenté les modélisateurs pour savoir à quel point ils sont pointilleux et critiques »[1824].

L'un des effets des *plateformes méta-disciplinaires* est donc celui de produire des reconfigurations théoriques, techniques et sociales dans les disciplines originaires de leurs membres. Mais il y en a un autre encore plus sensible.
Puisqu'on peut voir ces carrefours de disciplines comme des espaces d'*ingénierie interdisciplinaire* (voir chapitre 10), ils se configurent en *tisseurs de liens* à tel point qu'ils peuvent devenir des forges de nouvelles spécialités ou domaines de recherche : les domaines des réseaux complexes, de la vie artificielle et de l'épidémiologie computationnelle se sont constitués à l'intérieur de, et grâce aux sciences de la complexité ; tout comme la neuroéconomie ou la neuroesthétique se sont formées au sein des sciences cognitives, autre *plateforme méta-disciplinaire*.
Nombreux historiens et sociologues ont mis en évidence la non-pérennité des disciplines. Pour chaque science, même pour celles qui ont réussi à établir des inerties puissantes, il n'y a jamais d'état final et définitif : autrement dit, toute science peut, d'un jour à l'autre ou par déplacements progressifs, disparaître. Une caractéristique des *plateformes méta-disciplinaires* est celle d'être bien moins inertielles que les disciplines ou les spécialités : pour prendre à nouveau l'exemple des réseaux complexes, cette spécialité semble avoir des fortes chances de s'institutionnaliser assez solidement pour avoir une vie relativement longue et globalisée. En revanche, les SSC dépendent fortement ici des financements privés et fédérales du SFI et là des fonds européens et du CNRS. Même si le langage de la complexité domine dans les politiques scientifiques des dix dernières années en France[1825], signe que le lobbying des entrepreneurs scientifiques a percé[1826], la flexibilité et l'instabilité des SSC les rendent plus vulnérables et évanescentes que les disciplines ou les spécialités.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé le concept de *plateforme méta-disciplinaire* pour essayer de saisir les SSC dans leur spécificité socio-épistémique. Cette intersection pluridisciplinaire, unifiée sous un discours suffisamment vague pour pouvoir mettre ensemble des entomologues et des linguistes, permet à ses représentants de trouver un

[1824] *Ibid.*
[1825] Par exemple : le Contrat d'objectifs entre l'État et le Centre national de la recherche scientifique 2015-2018 ; ou la Stratégie nationale de recherche et d'innovation, 2009.
[1826] Pumain fait l'hypothèse selon laquelle le concept fondamental de la complexité au sens du SFI et de l'ISC-PIF, à savoir celui d'émergence, ait percé efficacement grâce à sa synonymie avec le langage et le concept de l'innovation. Elle témoigne, ayant fait partie du comité de la SNR 2009, que les autres membres ne connaissaient pas les SSC au sens propre, ce qui veut dire que, pour la plupart d'entre eux et d'entre elles, c'est dans un sens général que la complexité était employée : entretien avec Denise Pumain, 27.09.17.

espace d'accueil, de capter des fonds et de reconfigurer leurs disciplines d'appartenance. Pour caractériser les SSC il ne faut pas les voir comme ontologiquement différentes par rapport à n'importe quelle autre communauté de savoirs. Si on examine l'histoire des disciplines, on trouvera les mêmes frontières mouvantes, les mêmes jeux de parasitisme, de bricolage, les mêmes *patchworks*, les mêmes stratégies institutionnelles partout. Ce qui fait la spécificité des SSC, c'est qu'elles sont soudées par intermittence, elles servent d'appui pour mieux concurrencer avec les disciplines de départ de ses représentants, elles ont moins d'ancrages institutionnels et donc résultent plus susceptibles de disparaître. Ainsi, notre terme même ne se veut pas un terme essentialisant, mais un terme à échéance – non pas parce qu'on est sûr que ce domaine va s'essouffler, mais parce qu'il va certainement changer – comme tout autre domaine des savoirs – mais plus vite encore que la plupart des sciences. Or, si les personnes s'inscrivant dans l'étude des systèmes complexes ne sont pas d'accord entre elles et si les labels des financements, voire les institutions peuvent être supprimés d'une année sur l'autre, qu'est-ce qui nous légitime à l'emploi d'un concept figeant et définitif ?

En conclusion, nous émettons l'hypothèse que le terme de *plateforme méta-disciplinaire* convient à d'autres domaines scientifiques. Les sciences cognitives, les sciences du système Terre ou les multiples domaines des « *studies* » pourraient être des bons candidats. Tous ces savoirs se définissent comme des domaines pluri- et interdisciplinaires, dont les protagonistes et les analystes ont du mal à définir les frontières et à fournir des définitions unitaires. Les prémisses communes sont en effet suffisamment poreuses et flexibles pour pouvoir donner droit de citoyenneté à des figures très différentes en leur sein. Ces domaines abritent en outre de multiples paradigmes, parfois s'ignorant mutuellement ou se trouvant en concurrence réciproque.

Les formes du travail scientifique interdisciplinaire

La littérature sur l'interdisciplinarité est imposante. Elle aborde, parfois avec un regard normatif, la nécessité de faire dialoguer les sciences, ou bien elle traite, de manière plus descriptive, les formes que peuvent prendre les rencontres entre cultures scientifiques différentes. En outre, elle met rarement à distance le terme et le concept même d'interdisciplinarité, en le nommant différemment – ce que nous proposons de faire par le terme d'*interculturalité épistémique*. Bien que plusieurs travaux s'occupent de classifier les différentes formes de collaborations entre disciplines, il existe, à notre connaissance, très peu de travaux qui abordent les différentes figures du travail scientifique interdisciplinaire[1827]. Dans ce qui suit, on va proposer une discussion non-exhaustive de la littérature sur l'interdisciplinarité : elle permet de poser le cadre, de voir ce qui s'est fait et d'avancer les premières définitions. Nous allons ensuite proposer de distinguer cinq figures du travail scientifique interdisciplinaire : les *transfrontaliers*, les *ambassadeurs*, les *polyglottes*, les *bilingues* et les *traducteurs*. Il s'agit d'esquisser un tableau et une analyse de ces formes, selon deux axes : le nombre de chercheurs et chercheuses impliqués et le nombre de savoirs mobilisés. On puisera principalement dans le terrain des SSC mais aussi de domaines proches comme la systémique de Ludwig von Bertalanffy, la systémique d'Herbert Simon et la biologie de systèmes de François Taddei.

De la co, pluri, inter, trans et méta-disciplinarité

D'innombrables travaux, collectifs et individuels, sous forme d'articles ou de livres, portent sur la question du dialogue entre disciplines différentes. La revue qui suit vise surtout à donner une idée de la variété des discours en présence et à poser les jalons pour la discussion suivante.

Plusieurs travaux philosophiques, sociologiques et pluridisciplinaires se sont penchés sur la question. En 1987, Isabelle Stengers dirige un ouvrage, dans lequel des scientifiques et des philosophes abordent la question de la propagation de concepts, qualifiés de « nomades », entre secteurs différents de la science[1828]. Au début des années 1990, Marcel Jollivet[1829] a dirigé un ouvrage choral incluant des chercheurs et des chercheuses issus des sciences humaines et naturelles pour montrer des exemples de collaboration fructueuse entre les deux mondes. En 1994, Michael Gibbons et cinq autres collègues publient le fameux *The new production of knowledge*[1830], dont la thèse

[1827] Ils seront discutés dans la conclusion du chapitre.
[1828] Stengers, I. (ed.), *D'une science à l'autre*, *op. cit.*
[1829] Jollivet, M. (ed.), *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, Paris, CNRS éditions, 1992.
[1830] Gibbons, M. et al., *The new production of knowledge*, *op. cit.*

est que, depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les technosciences seraient bien plus transdisciplinaires et focalisées sur des problèmes complexes qu'avant la Seconde Guerre. L'ouvrage publié par Dominique Vinck[1831] vise à répondre à des questions d'ordre pratique pour l'enseignement et la recherche en contexte interdisciplinaire, tirant des leçons d'expériences technoscientifiques dans l'université, la recherche, l'école et l'industrie. L'ouvrage dirigé par Peter Weingart et Nico Stehr[1832] analyse, lui aussi, des exemples concrets, pour soutenir la thèse selon laquelle la matrice classique des disciplines est en train de se dissoudre, ce qui représenterait un progrès pour le savoir et la société.

Certains philosophes, en particulier, se sont beaucoup investis dans la réflexion sur l'interdisciplinarité, en général pour essayer de trouver des outils pour l'encourager et l'appuyer. Le psychosociologue Guy Palmade[1833] a dédié un texte de caractère philosophique et méthodologique aux obstacles à l'interdisciplinarité, surtout en analysant des entraves d'ordre idéologique. Si l'ouvrage dirigé par Frédéric Darbellay[1834] se veut un appel à la créativité scientifique grâce à une circulation rigoureuse de concepts, analogies et métaphores entre les sciences, l'ouvrage dirigé par Nicole Mathieu et Anne-Françoise Schmid[1835] vise à bien distinguer les pratiques de la modélisation de celles de l'interdisciplinarité car, selon les éditrices, elles sont trop souvent assimilées, alors qu'il faudrait à leur avis en étudier les articulations d'un point de vue épistémologique. À l'aune de Vinck, Darbelley a dirigé un autre ouvrage, avec Theres Paulsen[1836], dans l'objectif était de fournir aux enseignants des outils pédagogiques pour diriger les étudiants dans des pratiques interdisciplinaires. Par ailleurs, toute l'œuvre d'Edgar Morin aborde, d'une manière ou d'une autre, la question de l'interdisciplinarité et de la transdisciplinarité, en se proposant de les théoriser et de les pratiquer[1837].

De nombreux travaux soulignent la nature paradoxale de l'injonction concernant l'interdisciplinarité, car tous les discours officiels de politique scientifique font l'éloge du dialogue entre les disciplines, tandis que les pratiques interdisciplinaires sont souvent vues avec méfiance dans le milieu académique : ceci devient patent lorsqu'un scientifique avec plusieurs « casquettes » rencontre des difficultés dans le

[1831] Vinck, D. (ed.), *Pratiques de l'interdisciplinarité : Mutations des sciences, de l'industrie et de l'enseignement*, Grenoble, PUG, 2001.

[1832] Weingart, P. & Stehr, N., *Practising interdisciplinarity*, Toronto, Buffalo, London, University of Toronto Press, 2000.

[1833] Palmade, G., *Interdisciplinarité et idéologies*, Paris, Economica, 1999.

[1834] Darbellay, F. (ed.), *La circulation des savoirs. Interdisciplinarité, concepts nomades, analogies, métaphores*, Berne, Peter Lang, 2012.

[1835] Mathieu, N. & Schmid, A.-F. (ed.), *Modélisation et interdisciplinarité*, *op. cit.*

[1836] Darbellay, F. & Paulsen, T., *Le défi de l'inter- et transdisciplinarité. Concepts, méthodes et pratiques innovantes dans l'enseignement et la recherche*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.

[1837] Morin, E., « Sur l'interdisciplinarité », *Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études Transdisciplinaires*, n. 2, 1994 ; Morin, E., *La Méthode*, Paris, Seuil, 1977-2004, 6 vol.

recrutement[1838]. Quelques articles mettent l'accent sur l'alliance entre la science sur projet d'inspiration néolibérale et l'impératif interdisciplinaire, accusé de vouloir abattre les barrières disciplinaires pour abattre l'autonomie des disciplines par rapport aux injonctions du monde économique et politique[1839], tandis que d'autres analysent les difficultés rencontrées par les chercheurs et les chercheuses pour mener un véritable travail interdisciplinaire dans le contexte courtermiste du nouveau management de la recherche[1840]. Certains travaux reviennent sur l'histoire de la disciplinarisation, qui aurait commencé au XVIII[ème] siècle, et sur l'introduction, pour la première fois en 1959[1841], de l'attribut « interdisciplinaire », pour faire l'éloge des passeurs de frontières[1842], tandis que d'autres proposent un éloge de l'« indisciplinarité » ou de l'« indiscipline »[1843] et de la « sérendipité »[1844] ; certains affirment que l'interdisciplinarité réussie est souvent plutôt une affaire individuelle[1845], tandis que d'autres suggèrent une théorie de l'interdisciplinarité en s'inspirant de la philosophie de Gilbert Simondon[1846] ; certains analysent la percée des pratiques interdisciplinaires au CNRS[1847], tandis que d'autres essayent de fournir des outils d'évaluation pour la recherche inter et transdisciplinaire[1848]. Des textes normatifs, voire engagés, s'attèlent à indiquer les modalités les plus efficaces pour mener à bien des projets de recherche, ou une carrière, interdisciplinaires[1849]. La liste pourrait continuer…

Les textes qui proposent des définitions sur les formes que peut prendre le dialogue entre les disciplines vont nous intéresser en conclusion de cette première section.

[1838] Trabal, P., Collinet, C. & Terral, P., « Faire preuve d'interdisciplinarité. Un mot d'ordre, ses interprétations et ses ajustements », *Terrains & Travaux*, 2017, vol. 1, n. 30, pp. 209-229 ; Besnier, J.-M. & Perriault, J., « Introduction générale », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 13-15.

[1839] Marcovich, A. & Shinn, T., « Where is disciplinarity going ? Meeting on the borderland », *Social Science Information*, 2011, vol. 50, n. 3-4, pp. 582-606.

[1840] Prud'homme, J. & Gingras, Y., « Les collaborations interdisciplinaires », *op. cit.*

[1841] Meynaud, J., *Introduction à la science politique*, Paris, Armand Colin, 1959.

[1842] Valade, B., « La traverse des disciplines : passages et passeurs », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 80-89.

[1843] Oustinoff, M., « (In)discipline et interdisciplinarité: des mots aux choses », *Hermès*, 2013, vol.3, n.67, pp. 21-24 ; Wolton, D., « Conclusion. Pour un manifeste de l'indiscipline », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 64, pp. 210-222.

[1844] Catellin, S., « Sérendipité et indisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 32-40.

[1845] Bühler, E.A., Cavaillé, F. & Gambino, M., « Le jeune chercheur et l'interdisciplinarité en sciences sociales. Des pratiques remises en question », *Natures Sciences Sociétés*, 2006, vol. 14, n. 4, pp. 392-398.

[1846] Barthélémy, J.-H., « Encyclopédisme et théorie de l'interdisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 165-170.

[1847] Hermès, « Disciplines, instituts et interdisciplinarité au CNRS », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 188-191.

[1848] Klein, J.T., « Evaluation of Interdisciplinary and Transdisciplinary Research. A Literature Review », *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, vol. 35, n. 2, pp. 116-123 ; Borderon, M., Buchs, A., Leblan, V ; & Vecchione, E., « Réflexivité et registres d'interdisciplinarité. Une boussole pour la recherche entre natures et sociétés », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, vol. 23, n. 4, pp. 399-407.

[1849] Lepetit, B., Propositions pour une pratique restreinte de l'interdisciplinarité, *Revue de synthèse*, 1990, vol. 111, pp. 331-338 ; Charaudeau, P., « Pour une interdisciplinarité 'focalisée' dans les sciences humaines et sociales », *Questions de communication*, 2010, n. 17, pp. 195-222 ; Darbellay, F., « Vers une théorie de l'interdisciplinarité ? Entre unité et diversité », *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 2011, vol. 7, n. 1, pp. 65-87.

Co-disciplinarité. Selon Lionel Dupuy, l'un des rares à en parler avec Guy Palmade[1850], la co-disciplinarité « concerne l'étude d'un objet à partir souvent de deux disciplines tellement imbriquées l'une à l'autre qu'il est impossible de procéder autrement : par exemple, on ne peut pas étudier la 2ème Guerre Mondiale en histoire sans y associer la géographie »[1851].

Multi-(pluri- ou poly-)disciplinarité. La multidisciplinarité est souvent définie comme une « simple » juxtaposition de plusieurs disciplines pour attaquer un même problème, sans qu'il y ait un « vrai » échange entre celles-ci[1852]. L'attitude vis-à-vis de cette méthode, de la part des SHS mais aussi de la part des scientifiques que nous avons interviewés, est plutôt négative. Pour ne donner qu'un exemple, Cris Moore du SFI distingue entre une interdisciplinarité « superficielle » et une « profonde », la première se limitant à l'application d'un outil d'une discipline à l'objet d'une autre discipline, tandis que la seconde pratiquerait un vrai dialogue capable de transformer les deux ou plusieurs cultures en collaboration[1853].

Interdisciplinarité. En fonction des auteurs, l'interdisciplinarité est parfois rapprochée de la pluridisciplinarité, parfois de la transdisciplinarité. Julie Klein[1854] distingue entre interdisciplinarité étroite (collaboration entre disciplines proches) et large (collaboration entre disciplines lointaines), entre interdisciplinarité partagée (des disciplines diverses collaborent sur le même objet, sans intervenir les unes sur les autres) et coopérative (lorsque les disciplines s'influencent réciproquement dans un objectif commun), ou encore entre interdisciplinarité méthodologique (collaboration entre disciplines pour un meilleur résultat) et théorique (collaboration pour la création d'un nouveau cadre commun). Lionel Dupuy définit l'interdisciplinarité comme un « croisement fertile » entre démarches disciplinaires différentes, afin de comprendre l'objet d'étude de manière « plus complète, voire systémique »[1855]. Ève Anne Bühler et ses collègues[1856] distinguent deux formes d'interdisciplinarité, celle de proximité (lorsque, par exemple, la sociologie emprunte un concept à l'anthropologie), qui relève soit de l'emprunt temporaire soit d'une réadaptation ou transfert permanent, et celle dédaléenne : « [c]'est l'expérience de jeunes chercheurs qui se trouvent limités dans la compréhension de leur objet et qui se tournent vers de nouvelles disciplines pour trouver des éléments de compréhension et d'analyse plus heuristiques. […] Ce qui au

[1850] Palmade, G., *Interdisciplinarité et idéologies*, *op. cit.*

[1851] Dupuy, L., « Co, multi, inter, ou trans-disciplinarité ? La confusion des genres… », Document de travail à destination des étudiants du Certificat International d'Écologie Humaine, pp. 4 : https://web.univ-pau.fr/RECHERCHE/CIEH/documents/La%20confusion%20des%20genres.pdf.

[1852] Kleinpeter, É., « Taxinomie critique de l'interdisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 123-129 ; Dupuy, L., « Co, multi, inter, ou trans-disciplinarité ? », *op. cit.*

[1853] Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.

[1854] Klein, J.T., « A Taxonomy of Interdisciplinarity », dans Frodeman, R., Klein, J.T. & Mitcham, C., (ed.), *Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, Oxford, Oxford University Press, 2010, pp. 16-30.

[1855] Dupuy, L., « Co, multi, inter, ou trans-disciplinarité ? », *op. cit.*

[1856] Bühler, E.A. et al., « Le jeune chercheur et l'interdisciplinarité en sciences sociales », *op. cit.*

départ relevait de l'emprunt à une autre discipline aboutit à une fusion des deux disciplines »[1857].

Transdisciplinarité. Il existe plusieurs définitions différentes de transdisciplinarité, en termes d'échelles, de pratiques, de résultats, parfois chez un même auteur. Selon Edgar Morin, transdisciplinarité il y a lorsque des schèmes cognitifs traversent les disciplines[1858]. Pour Basarab Nicolescu, « la transdisciplinarité concerne ce qui est à la fois entre les disciplines, ce qui traverse les différentes disciplines et ce qui va au-delà de toute discipline »[1859] : elle procéderait par trois principes – niveaux multiples de la Réalité, logique du tiers inclus et complexité – et serait à la fois une nouvelle vision et une expérience vécue. Lionel Dupuy la définit comme une approche nourrie d'interdisciplinarité, une sorte d'« esperanto scientifique », qui vise à « dégager des éléments transversaux à toutes les disciplines », pour éventuellement aboutir à un nouveau savoir, avec des nouvelles démarches et des nouveaux objets d'étude[1860]. Édouard Kleinpeter va dans la même direction, car pour lui la transdisciplinarité serait « un canevas général, une sorte de super- ou de métadiscipline, dont chaque discipline serait une réalisation particulière »[1861]. Pour Charaudeau, « [i]l s'agit d'une intégration des savoirs de diverses disciplines de telle sorte qu'émerge un discours *sui generis* construisant son propre lieu de pensée »[1862]. Toutefois, pour d'autres auteurs elle assume une signification semblable à celle qui est la plus courante à propos de l'interdisciplinarité, comme transfert de connaissances entre disciplines différentes[1863]. Et parfois, transdisciplinarité est le nom que prennent les débats entre « parties prenantes » différentes (décideurs, industrie, experts technoscientifiques, associations, citoyens et citoyennes) lorsqu'elles doivent décider du futur d'une communauté[1864].

Ce chapitre est le résultat d'un travail inductif mené à partir de l'observation de pratiques matérielles. Si même les travaux sociologiques sur l'interdisciplinarité se révèlent être normatifs, nous avons évité toute hiérarchisation et tout jugement de valeur à propos des formes observées du travail scientifique interdisciplinaire.

Une classification du travail scientifique interdisciplinaire

[1857] *Ibid.*, p. 395.
[1858] Morin, E., « Sur l'interdisciplinarité », *op. cit.*
[1859] Nicolescu, B., « The transdisciplinary evolution of learning », *Centre International de Recherches et d'Études Transdisciplinaires*, *Proceedings of the International Congress on What University for Tomorrow? Towards a Transdisciplinary Evolution of the University*, Locarno, 30 April-2 May 1997, pp. 1-11. Disponible en ligne : http://www.learndev.org/dl/nicolescu_f.pdf.
[1860] Dupuy, L., « Co, multi, inter, ou trans-disciplinarité ? », *op. cit.*
[1861] Kleinpeter, É., « Taxinomie critique de l'interdisciplinarité », *op. cit.*
[1862] Charaudeau, P., « Pour une interdisciplinarité 'focalisée' dans les sciences humaines et sociales », *op. cit.*
[1863] Debru, C., *La transdisciplinarité. Comment explorer les nouvelles interfaces*, Paris, Hermann, 2011.
[1864] Pestre, D., « L'évolution des champs de savoir, interdisciplinarité et noyaux durs », *op. cit.*

Le concept de *zone de transaction* proposé par l'historien des sciences Peter Galison[1865] est l'un des concepts les plus utilisés des STS, non seulement à l'intérieur du champ mais aussi dans les SHS plus en général et parfois même en dehors. En s'inspirant de l'anthropolinguistique, Galison adapte à l'étude de la physique tout un outillage conceptuel qui se révèle extrêmement heuristique pour appréhender la relation entre les différentes sous-cultures de cette discipline. Les *zones de transaction* sont ainsi définies comme un domaine intermédiaire entre plusieurs sous-cultures de la physique, où plusieurs procédures scientifiques sont négociées, coordonnées et implémentées. Grâce à la création de langages intermédiaires communs, des groupes culturellement différents peuvent échanger des biens, des outils, des savoirs, même en ayant des métaphysiques de départ différentes par rapport à ces objets :

> « Rather than depicting the movement across boundaries as one of translation […] it will prove useful to think of boundary work as the establishment of local languages – pidgins and creoles – that grow and sometimes die in the interstices between subcultures »[1866].

Par conséquent, il peut y avoir des pidgins élémentaires, composés de quelques centaines de mots, ou des pidgins plus complexes, riches de termes et flexibles grammaticalement, ou bien des créoles, à savoir des pidgins qui se sont complexifiés à tel point qu'ils ont atteint le niveau de langage naturel, avec leur autonomie et leur puissance expressive. Les pidgins naissent pour des usages locaux et ciblés, ils peuvent varier selon les contextes, en raison du fait qu'on commerce des biens différents selon les occasions, et peuvent aussi s'éteindre. Cette métaphore anthropolinguistique, que Galison emploie souvent dans des situations sans un langage verbal (il parle en effet de « *wordless pidgins* » et « *wordless creoles* »), lui a servi pour la description d'objets matériels, y compris lorsqu'il s'agit de simulations comme les « Monte Carlo ». Celles-ci, explique Galison, servaient de zone frontière à des figures si diverses que peuvent l'être des ingénieurs électriques, des physiciens, des ingénieurs aérospatiaux, des mathématiciens appliqués ou des ingénieurs d'armes nucléaires.
Or, pour pertinente que puisse être cette boîte à outils conceptuelle, nous constatons qu'elle n'épuise pas toutes les manifestations du langage interculturel que nous avons pu observer sur notre terrain. Elle est capable de rendre compte des situations de rencontre entre deux ou plusieurs collectifs, qui ont besoin de se comprendre pour parvenir à un objectif commun. Mais elle ne tient pas compte de situations d'interdisciplinarité plus locale, voire individuelle. Comme on le verra, la situation décrite par le concept de *trading zone* correspond surtout à l'une de nos catégories (celle du *transfrontalier*). Avant de proposer notre classification des modalités que

[1865] Galison, P., *Image and Logic*, *op. cit.*
[1866] *Ibid.*, p. 47.

peut prendre le travail scientifique interdisciplinaire, une spécification terminologique doit être faite.

On a utilisé jusqu'ici le terme indigène d'interdisciplinarité sans le questionner ni le mettre entre guillemets. Cela pour des raisons de lisibilité. C'est le moment toutefois de l'interroger et de le traduire, grâce à l'apport de Galison et de Knorr-Cetina, dans un langage qui nous paraît plus convenable pour l'analyse.

Nous définissons l'interdisciplinarité comme ce phénomène socio-épistémique où des cultures scientifiques différentes se rencontrent et dialoguent. L'interdisciplinarité est donc la manifestation d'un inter-culturalisme. Ce n'est pas seulement une affaire cognitive, épistémologique et méthodologique, mais aussi de pratiques, de matérialité, de règles et de normes sociales, de métaphysiques, même de politiques ou d'idéologies différentes. On continuera tout de même à utiliser le terme d'interdisciplinarité par la suite, car le terme d'*interculturalité épistémique* est un peu lourd. Mais en employant le premier, nous signifierons le second. À la lumière de cette traduction, tous les autres termes (co, multi, transdisciplinarité) peuvent être réinterprétés également par le terme général d'*interculturalité épistémique*, sachant que le sociologue doit en relever, dans chaque description, les caractéristiques épistémiques, matérielles, institutionnelles, etc. spécifiques.

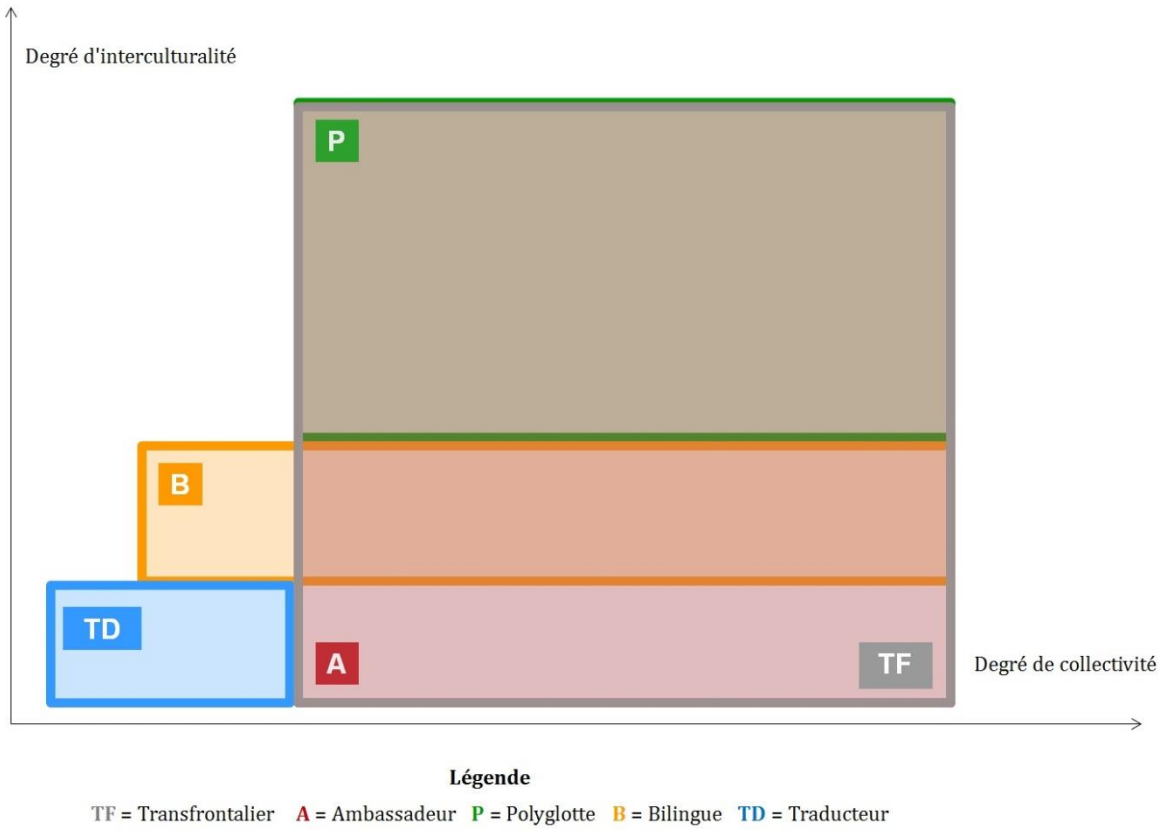


Figure 11. Tableau qui résume les cinq idéaux-types du travail scientifique interdisciplinaire selon les deux axes du degré d'interculturalité et du degré de collectivité

Passons maintenant en revue les cinq profils du travail interdisciplinaire rencontrés sur le terrain des SSC – qui est certes riche, mais qui n'épuise probablement pas l'éventail des formes de ce travail. Nous avons choisi la sphère de la diplomatie internationale pour tirer des métaphores homogènes dans la dénomination des cinq catégories : *transfrontaliers*, *ambassadeurs*, *polyglottes*, *bilingues* et *traducteurs*. Comme le montre la figure 1, on peut imaginer de les organiser dans un tableau borné par deux axes cartésiens, l'un concernant le degré de collectivité du travail scientifique, d'individuel à plus ou moins choral, et l'autre décrivant le nombre de savoirs convoqués, d'un minimum de deux à un maximum indéfini de savoirs impliqués. L'ordre dans lequel on va les traiter par la suite procède du plus collectif au plus individuel.

Les transfrontaliers

Le cas de figure des *transfrontaliers* est le mieux documenté par Galison, lorsqu'il traite des *zones de transaction*. Nous utilisons la métaphore du *transfrontalier*, car ce terme définit quelqu'un qui franchit une frontière pour les raisons les plus diverses, y compris l'échange de biens. Galison parle de pidgins ou de créoles qui naissent lorsque deux groupes humains aux cultures différentes nécessitent un langage tiers, simplifié et pragmatiquement orienté, pour mener à bien l'échange. Il s'agit donc d'un terme que l'on peut appliquer à toutes les situations où des scientifiques d'au moins deux domaines de recherche différents parviennent à parler ou collaborer pour atteindre une formalisation commune et nouvelle, qu'elle soit immédiatement opérationnelle ou pas. Les *workshops intégratifs* organisés par le SFI tout au long de son histoire institutionnelle ont toujours été le lieu désigné pour un tel type d'échanges transfrontaliers :

> « In early October [1998], a group of biologists and a group of computer scientists spent four days at the Santa Fe Institute learning, well, how to talk to each other.
> Each group has something the other group wants. But before they can trade solutions, ideas or even words, they must first find some common language to successfully communicate their objectives »[1867].

Voilà deux mots-clés employés par Galison et qui reviennent dans le langage indigène des scientifiques eux-mêmes : « commerce » et « langage commun ». La « recette », si ainsi peut-on dire, que le SFI a employé dès le début de son histoire pour mettre en place ces ateliers interdisciplinaires est décrite par Mike Simmons en 1990 ainsi : l'on organise un workshop suffisamment long (une semaine ou deux), les participants sont sélectionnés par leur excellence et leur ouverture d'esprit, on assure une ambiance

[1867] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1, p. 15.

informelle et on permet d'interrompre à tout moment celui qui parle[1868]. John Holland décrit la démarche de travail avec plus de détails : « they begin free-associating what they've seen with similar phenomenon in their own specialties. As they talk they struggle to translate the phenomenon of simulation into as many scientific dialects as possible, and then to unify the lingo »[1869]. Le processus de la première période du SFI se synthétise donc en quatre phases : présentation d'un outil ou d'un modèle, phase de *brainstorming*, tentatives de traduction en plusieurs langages scientifiques et enfin tentative de synthèse[1870].

Nous avons vu que le SFI revendique une recherche théorique. Partant, à la différence des cas décrits par Galison qui étaient contraints par la résolution d'un problème de guerre, ce ne sont pas forcément les « applications » qui créent les conditions d'un nouveau langage : « Cross-disciplinary thinking is essential to the mission of the Institute, and it is abstract metaphors that link people, not particular applications »[1871]. Le SFI a en effet dédié des congrès et des publications (livres ou bulletins) à la question des métaphores et des analogies[1872]. Les métaphores sont vues comme ce pidgin qui peut permettre à des cultures scientifiques différentes de se comprendre : « Language scholars define metaphor in various ways, but most say that it is a rhetorical device for transporting knowledge by using a word that brings connotations from one field into play in another field »[1873]. Walter Fontana ajoute : « Metaphor makes people realize that certain old questions can be cast as new ones. It triggers new thoughts and speculations »[1874]. L'objectif du SFI, nous l'avons vu, est celui de la détection de motifs communs à plusieurs systèmes complexes : « Things have become so splintered in academia. People have one small thing they know about. But here we learn to see patterns »[1875]. Ce que l'on constate c'est la réflexivité prononcée des *transfrontaliers* dans ce qu'ils font ; on a l'impression de lire du Galison :

> « When practitioners of different disciplines meet to share ideas and work collaboratively, this difference in language is immediately clear and frequently troublesome. The language of physics does not lend itself easily to discussions about the economy ; nor does the language of economics lend itself to physics. The task of mutually interpreting these languages requires a partial inversion of the foreground-background distinction, at least temporarily, on both sides. At this point,

[1868] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 10.
[1869] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 4.
[1870] Une conférence intitulée « Common Themes in Complex Adaptive Systems » est organisée en 1992 pour chercher des points en commun entre les outils de l'époque (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, systèmes dynamiques et criticalité auto-organisée) : SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2, p. 33.
[1871] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 4.
[1872] Cowan, G. (ed.), *Complexity. Metaphors, Models, And Reality*, Boston, Addison Wesley, 1994.
[1873] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2, p. 28.
[1874] *Ibid.*
[1875] *Ibid.*, p. 23.

new parts of the landscape are illuminated, though largely by the light of the old lamps. When these collaborations are successful, a new meta-language eventually emerges. But here too, this meta-language does not correspond to a new set of foreground objects so much as to a higher-order set of relationships at the boundaries between figure and ground »[1876].

Pour revenir de ce côté de l'Atlantique, nous avons en France un cas paradigmatique avec la collaboration que Géographie-Cités et l'ISC-PIF ont mis en place, en faisant collaborer des géographes et des informaticiens. Si l'on interroge l'un des informaticiens sur sa culture en géographie, il nous dira que ses connaissances dans ce domaine se sont construites moins par la lecture d'articles scientifiques que « par les codes »[1877], c'est-à-dire par le fait de devoir traduire en langage informatique toute une série de notions que les géographes lui demandaient de traduire : « Je ne me rends pas compte parce que [le processus d'acculturation] s'est fait assez facilement par socialisation et pas par lecture de l'état de l'art »[1878]. Quant à la question du langage commun, il distingue entre deux moments : le langage de travail, qu'on pourrait qualifier de pidgin, et le langage des publications. Nous pensons pouvoir parler de pidgin, parce que les informaticiens et les géographes, dans leur travail quasi-quotidien d'interface, ont en effet créé des nouveaux termes, soit par l'introduction de nouveaux concepts, soit par l'introduction de concepts déjà en usage dans d'autres domaines, soit par l'invention de termes humoristiques face à la nécessité de se comprendre vis-à-vis des outils partagés :

« [L'invention d'un langage entre nous] s'est fait mais j'ai l'impression que c'est parce qu'on a créé des nouveaux objets au passage. Méthode des profils, méthode PSE, ça c'est publié. Parfois on utilisait des termes humoristiques entre nous : la 'boîte à moustache' pour désigner un outil en statistique. C'est un terme qui existe déjà ailleurs. On a utilisé le terme de 'grille', non pas au sens de grille de calcul, on appelait 'grille des modèles' un tableau qu'avait sorti [la géographe] Clémentine [Cottineau]. Elle avait présenté une double grille de complexification. Elle avait une dimension qui était la complexification des interactions entre les agents, qui mettaient en jeu de plus en plus de degrés de liberté. Et l'autre c'était la complexification de l'environnement […]. La grille des modèle Marius, ça n'existe pas ailleurs mais quand on parle de ça entre nous on comprend tout de suite »[1879].

Pour ce qui est de l'écriture des articles, le groupe interdisciplinaire opérait selon un *travail de démarcation*, en adaptant les termes selon le public de leurs travaux :

[1876] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1, p. 32.
[1877] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1878] *Ibid.*
[1879] *Ibid.*

> « […] lors de l'écriture d'un article, il y a eu un débat sur le mot 'individu'. En géographie un individu en général c'est un être humain. Dans un modèle l'agent c'était une ville […]. Un individu en algorithmes génétiques c'est un génome et son évaluation, c'est une solution. À la fin de cet article, vu que c'était un article pour les géographes, on a choisi individu comme étant l'individu géographique. Et pour parler de l'algorithme génétique on employait 'jeu de valeurs candidates' (*set of parameters values*) »[1880].

Dans cette équipe, il y avait certes des informaticiens avec peu de connaissances géographiques et des géographes avec peu de connaissances informatiques. Mais il y avait aussi des informaticiens avec des études plus poussées en géographie et des géographes qui ont appris à programmer. Ces figures-là recoupent la catégorie des ambassadeurs.

Les ambassadeurs

L'ambassadeur, qui peut aussi être appelé *passeur,* c'est l'idéaltype de celui ou celle qui sert d'intermédiaire entre deux équipes aux cultures différentes, lesquelles n'interagissent pas systématiquement comme dans le cas des *transfrontaliers*. Dans une équipe interdisciplinaire, composée de deux sous-communautés qui se parlent peu et qui apprennent peu le langage de l'autre, les *ambassadeurs* sont fondamentaux pour établir un lien et un dialogue afin de la production conjointe de résultats et de travaux scientifiques. On peut retrouver des *ambassadeurs* dans les équipes de *transfrontaliers*, où ils facilitent certes le travail ; mais sans les *ambassadeurs*, des équipes interdisciplinaires qui ne produisent pas de pidgin ne pourraient guère travailler. Nous avons, en France, un exemple paradigmatique de ce cas de figure, dans une équipe composée de biologistes, d'une part, et d'ingénieurs et d'informaticiens, de l'autre. BioEmergences est un laboratoire du CNRS à Gif-sur-Yvettes qui s'occupe d'imagerie microscopique embryonnaire sur plusieurs animaux-modèle. En son sein, nous avons repéré (au moins) deux *ambassadeurs*, qui œuvraient de passeurs lorsqu'un problème de langage survenait entre des membres des deux grandes sous-communautés : nous employons cet adjectif, car dans chacune d'elle il y a plusieurs figures professionnelles différentes qui forment donc des micro-communautés ultérieures. Ces deux figures sont la chef du laboratoire et un doctorant biologiste avec des connaissances en informatique. Si la chef du laboratoire s'occupe surtout de concilier les biologistes expérimentaux avec les biologistes théoriques qui composent son laboratoire[1881], le doctorant s'occupe de fluidifier les collaborations entre les biologistes et les ingénieurs ou les informaticiens. Quant à la première, elle nous

[1880] *Ibid.*
[1881] Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.

racontait être en train d'écrire un article avec un collègue expert en biologie théorique, qui « a écrit [une section *Materials and methods* qui était] pour [elle] typiquement […] de biologiste théoricien avec une bonne connaissance de la biologie »[1882]. Elle clarifie ce point avec un exemple :

> « Et là, moi qui ai relu la chose et qui essaie d'avoir un discours qui soit cohérent pour lui et cohérent pour moi, reflétant quand même bien notre discours commun, je lui dis, 'Moi ça m'apporte rien que tu balances dans le discours qu'il y a les caténines [des protéines des cellules animales, impliquées dans les processus d'adhésion cellulaire]. Je veux dire, ça n'ajoute rien à ses hypothèses et ça compromet toute la pertinence de notre construction. Donc je lui dis finalement à un moment donné, 'Ne te justifie pas en disant qu'il existe des molécules quoi'. […] Et là au plan épistémologique, il y a un vrai problème quoi. […] Donc je vais dire, comment on fait pour réconcilier ça ? Pour les dix années qui viennent, je veux bien continuer à m'occuper de ce défi, si on me laisse faire »[1883].

Quant au doctorant, non seulement il utilise de façon autonome les algorithmes de traitement des images que produisent ses collègues ingénieurs, mais il interagit aussi avec les informaticiens et les mathématiciens qui les développent. Il est en effet capable de leur faire parvenir des requêtes ou des conseils précis de la part des biologistes, ou de produire ses propres programmes. Il nous relate ainsi que :

> « [d]ès que j'ai eu un ordinateur (même avant, avec la calculatrice), j'y ai mis les mains dedans pour faire de la programmation, pour faire des jeux, des trucs comme ça. C'est un langage que je connais et je peux parler sans problème avec un informaticien sans être perdu. J'utilise très souvent l'outil informatique et je développe moi-même des logiciels pour BioEmergences pour simplifier certaines tâches, pour automatiser [les algorithmes]. […] Je touche beaucoup à la partie informatique, du coup ça facilite un peu les échanges »[1884].

Comme nous l'ont expliqué les membres de cette équipe, la plupart du temps de travail est passé en solitaire, mais plusieurs d'entre eux finissent par travailler en binôme. Aucun des moments cruciaux de la recherche ne peut être mené à bien sans que deux ou plusieurs membres de l'équipe ne coopèrent et ne se comprennent sur un certain nombre de points décisifs. Par exemple, lorsque l'équipe conduit une expérience avec les microscopes, souvent l'ingénieur en microscopie accompagne la biologiste, pour vérifier que tout fonctionne correctement. Les deux apprennent de nombreuses notions l'un de l'autre, ce qui leur permet, au fil du temps, de mieux se comprendre. Hormis

[1882] *Ibid.*
[1883] *Ibid.*
[1884] Entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.

ces micro-pidgins locaux, ce sont les *ambassadeurs* qui couvrent la fonction sociale de facilitation interculturelle sur des questions plus globales pour la recherche du laboratoire.
Les *ambassadeurs* sont souvent recrutés précisément pour jouer le rôle d'intermédiaires, rôle qui ne leur déplaît pas. Le cas de Paul Chapron, informaticien qui connaît les SHS, est illustratif de ce point :

> « Paul [Chapron] […] c'est un intermédiaire, il se situe volontairement à la frontière entre le coté formel informatisé et le coté pluridisciplinaire, et lui il se plonge volontairement coté disciplinaire, fait de gros efforts de vulgarisation, de compréhension et lui il choisit de travailler en permanence à l'interprète. Je pense que c'est un facilitateur […] Paul a été recruté en tant qu'intermédiaire »[1885].

Les polyglottes

La catégorie du *polyglotte* désigne des scientifiques « de synthèse »[1886]. Il s'agit d'une figure, assez rare, de chercheur ou de chercheuse polyvalent, qui connaît plusieurs langages scientifiques et qui, de ce fait, peut coordonner des équipes pluridisciplinaires et les guider en suivant une « vision ». Vision au sens de « vision d'ensemble », mais aussi de direction à donner à la recherche. Comme l'ont souligné plusieurs des textes que nous avons cités dans la section précédente, il arrive souvent que les chercheurs et chercheuses qui mènent des travaux interdisciplinaires, ce sont ceux et celles qui ont un poste fixe, voire qui se trouvent en fin de carrière[1887]. Nous pensons de nouveau à Paul Bourgine, dont on a déjà souligné les multiples compétences : en modélisation numérique, en mathématiques, en économie, en sciences cognitives et en philosophie. Un informaticien, qui dit lui être reconnaissant, en parle ainsi :

> « Paul est assez visionnaire, enthousiaste […] j'ai peut-être moins de vision que ce que Paul a. Mais je me suis déjà trompé plein de fois où il m'a dit, 'Non mais ce qui est important c'est de faire ça', [et moi de lui dire] 'Mais Paul, c'est un délire, on ne fera jamais ça', et puis trois ans après tu te rends compte que t'es en train de faire ça. Bon OK, il avait raison »[1888].

D'autres ont théorisé la figure du « généraliste », en adoptant un point de vue normatif, et pour la recherche et pour l'enseignement. Si l'on regarde vers les États-Unis, l'on

[1885] Entretien avec Romain Reuillon, 07.02.17.
[1886] Expression du philosophe des sciences Sébastien Dutreuil.
[1887] Le géographe Arnaud Banos reporte une anecdote représentative à ce propos : « Je me souviens d'un jeune collègue physicien faisant une thèse en éconophysique et m'avouant continuer à faire des manipulations expérimentales la nuit afin de pouvoir encore publier dans son domaine d'origine et augmenter ses chances d'être recruté. On comprend qu'à ce prix-là l'interdisciplinarité reste fragile » : Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre, op. cit.*, p. 13.
[1888] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.

retrouve le discours de George Cowan, l'un des fondateurs du SFI. Pour lui, l'institut devait persuader « certaines personnes à devenir des généralistes, éduquer des personnes à élargir leur regard à travers plusieurs disciplines »[1889], selon idéal d'un « homme de la Renaissance du XXI[ème] siècle », capable d'avoir à faire avec « le monde réel chaotique [*messy*], qui n'est pas élégant, que la science n'adresse pas véritablement »[1890]. Que cela concerne les systèmes complexes ou simplement les systèmes, la figure du polyglotte semble être souvent l'apanage des systémiciens de diverse origine. Ludwig von Bertalanffy, avant Cowan, avait déjà employé le terme de « généraliste » dans un article, puis dans son livre sur la *Théorie Générale des Systèmes*[1891], en citant un article paru dans *Science* en 1949, écrit par quatre scientifiques d'horizons très divers, et dédié à l'éducation de scientifiques généralistes[1892]. Dans l'article, les auteurs partent du constat suivant : « The complexities of modern science and modern society have created a need for scientific generalists, for men trained in many fields of science »[1893]. Le but des généralistes, selon Hendrik Bode et collègues, n'est pas celui de connaître par cœur un ou plusieurs domaines, mais de connaître suffisamment de ces domaines pour faire en sorte d'accélérer le travail d'une équipe pluridisciplinaire :

> « [The scientific generalist] may not be as good a physicist as a student or research man who has been trained principally in physics, or as good a geneticist as the biologist who is trained in genetics, or as good an economist or engineer or psychologist as a specialist in those fields. But he has learned enough of these fields, and of the central tools of mathematics and statistics, to bring to problems of almost any kind the ideas and broad tools of any combination of these many subjects that will speed and improve the work »[1894].

C'est essentiellement un souci de gestion des équipes scientifiques : « Science is complex ; yet it must become manageable. It can be managed better with the help of a few scientists with training in many sciences »[1895]. Pour von Bertalanffy, sa théorie des systèmes fournissait des « principes basiques », ceux-là mêmes que Bode et ses collègues indiquaient comme nécessaires pour une synthèse interdisciplinaire et pour une intégration éducative[1896].

Pour rester dans la systémique, mais en changeant d'*horizon de rétrospection*, parlons un peu de Daniel Krob, mathématicien français se réclamant de la tradition d'Herbert

[1889] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 4.
[1890] *Ibid.*
[1891] Bertalanffy, L. von, *General System Theory*, *op. cit.*, pp. 49-51.
[1892] Bode, H., Mosteller, F., Tukey, F. & Winsor, C., « The Education of a Scientific Generalist », *Science*, June 3, 1949, vol. 109, pp. 553-558.
[1893] *Ibid.*, p. 553.
[1894] *Ibid.*, p. 554.
[1895] *Ibid.*, p. 558.
[1896] Bertalanffy, L. von, *General System Theory*, *op. cit.*, p. 51.

Simon. Ce chercheur et entrepreneur relate que son travail de synthèse pour l'ingénierie de systèmes complexes artificiels est appliqué à la production industrielle :

> « Pour construire une voiture il faut de la mécanique, de la géométrie, de la chimie, de la thermodynamique, de la thermique, de l'électronique, de l'informatique. Le problème est d'intégrer toutes ces disciplines différentes. Si on maîtrise les morceaux, ça ne veut pas dire qu'on maîtrise le système dans son ensemble. La systémique essaie de fabriquer des modèles d'intégration, comment les différentes boîtes doivent interagir pour faire fonctionner [la voiture] »[1897].

Non seulement Krob, mais aussi von Bertalanffy, Cowan et Bourgine identifient les mathématiques comme le langage universel pour réaliser l'unification entre domaines différents. Pour Krob en particulier, il s'agit de parvenir à un modèle général de production de n'importe quel objet industriel, de manière à intégrer de la façon la plus fluide et efficace toutes les disciplines convoquées dans le design.
Même si ce n'est pas toujours le cas, le *polyglotte* se trouve souvent donc dans une position de direction. François Taddei est un biologiste français au parcours multidisciplinaire (licence en mathématique et physique, diplôme d'ingénieur, thèse en génétique, postdoctorat en biologie évolutive). Il a fondé un centre de recherche et un cursus interdisciplinaires basés à l'Université Paris Descartes, le Centre de Recherches Interdisciplinaires. Cet extrait d'entretien illustre le rôle du *polyglotte* en tant qu'orchestrateur :

> « Je n'utilise pas toujours le même outil, je n'ai pas toujours la même question, mais j'essaie de trouver la combinaison outil-question qui me paraît permettre de faire des choses qui ont du sens pour moi et peut-être pour les autres, et si j'arrive à comprendre avec les autres que ce que je fais a du sens, tant mieux. J'ai changé beaucoup de fois de sujet, et j'ai changé beaucoup de fois d'approche. Et j'ai simplement à chaque fois su trouver des gens qui pouvaient m'aider à faire ce que je ne savais pas faire seul. Donc ça, je suis de ce point de vue-là un coopérateur, si tu veux. […] Parce que comme je connais différents domaines scientifiques, je peux parler avec des gens de disciplines différentes, et essayer de les agréger »[1898].

Or, les *polyglottes* diffèrent bien sûr des *bilingues* parce qu'ils connaissent plus de langues – bien que, de leur propre aveu, de manière moins approfondie ; mais les deux profils divergent également en raison du rapport qu'ils entretiennent avec le collectif. Si les *polyglottes* se retrouvent souvent à diriger des équipes nombreuses, le cadre de

[1897] Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.
[1898] Entretien avec François Taddei, 25.01.17.

travail des *bilingues* est plus individuel, tout en pouvant être collaboratif par intermittence.

Les bilingues

Nous appelons *bilingues* ces scientifiques qui connaissent de manière plus ou moins approfondie deux disciplines, ce qui leur permet de mener des recherches, individuellement ou en collaboration, en étant à cheval entre elles. Le bioinformaticien Guillaume Beslon revendique la possibilité de faire de l'interdisciplinarité tout seul :

> « pour moi la phase importante c'est la phase de construction du modèle. Après je l'exploite et pour l'exploiter, je vais le simuler mais cela reste un détail. C'est un détail technique. Très honnêtement, je pense qu'il y a beaucoup de gens qui se perdent dans les détails techniques dans les sciences de la complexité. Et pour moi, simuler un modèle, c'est du code. […] Elle ne m'intéresse pas la partie technique de mon travail. Ce qui m'intéresse, c'est l'aboutissement biologique. […] Je suis informaticien par mes techniques […] Et je suis biologiste dans mes questions. […] Je me suis battu avec pas mal de gens. Je prétends que l'on peut être interdisciplinaire tout seul »[1899].

Nous avons un autre cas typique avec Joachim Krug, un physicien allemand qui a appris, en autodidacte, les fondamentaux de la biologie évolutionnaire, pour collaborer avec des biologistes expérimentaux. La première chose qu'il nous dit concerne beaucoup de ses collègues issus de la physique statistique :

> « My perception is that generally what has happened in [statistical physics] is that people have gone off into different areas outside of traditional physics and many of them have become serious about it and have become more specialized in those areas. So for my own part, I started working on biological evolution about ten or twelve years ago. And nowadays it is sort of what I do »[1900].

En termes d'identité, il se sent toujours rattaché à sa communauté d'origine : « I still try to keep contact with the community of statistical physicists. I would still consider myself as [one of them] »[1901]. Au début de sa carrière, il explique avoir dû conduire des recherches conventionnelles, à cause, dit-il, du conservatisme du système académique allemand. Une fois arrivé dans son laboratoire actuel à Cologne, il a pu entamer des collaborations avec des biologistes *in situ*. Leur projet prit le nom de « Molecular basis of evolutionary innovations ». En quoi consiste la collaboration ? On s'aperçoit d'emblée que cela diffère de la manière de travailler des *transfrontaliers*

[1899] Entretien avec Guillaume Beslon, 15.09.15.
[1900] Entretien avec Joachim Krug, 18.11.15.
[1901] *Ibid.*

ou des *ambassadeurs*. Avant de démarrer la collaboration, le physicien a dû lire des articles de biologie pour connaître le genre de questions que les outils dont il disposait pouvaient aider à répondre :

> « I think what you always try to do is to connect to something that you already know. I didn't, and sometimes I think I probably should have done at some point, but there's never time… I didn't study the field systematically, I didn't attend courses and I didn't read textbooks. But instead what I tried to find was a kind of entry point, right ? So you look at the things that you know and then you try to identify a part of the new field where you think you can contribute something, and where there's a question that is, you know, biologically relevant, and at the same time is tractable with the tools that you have »[1902].

Les *bilingues* ont un apprentissage plutôt ciblé de la discipline qu'ils apprennent en cours de route. Mais l'utilitarisme n'est pas le seul critère pour choisir la problématique à traiter. L'attractivité intellectuelle du problème (mathématique en l'occurrence) est également prise en compte :

> « I'm a theoretical scientist, I'm not a mathematician, but I have a kind of strong liking for mathematics. So in choosing the problem that I work on is also important that it should be mathematically attractive somehow [...] There are many problems in biology that are very important and people should work on that, but [this does not occur] simply because the state of the field doesn't make sense to approach with a lot of mathematical sophistication and then this is less interesting for me, I mean just personally, you know, I want something that has some mathematical meat in it as well »[1903].

En quête d'un authentique plaisir mathématique, Krug se met au service des biologistes, il les suit en étudiant leur discipline plus que ce que ces derniers ne le font avec la physique statistique : « They don't need to know any physics »[1904]. Donc, lorsque Krug affirme que les barrières linguistiques tombent de plus en plus avec le temps, c'est dans un sens asymétrique qu'il faut l'entendre :

> « I think the language barriers disappear gradually as you talk to each other. Basically the way the collaboration works is of course that the biologists do experiments and produce data, and we [physicists] help them somehow to interpret

[1902] *Ibid.*
[1903] *Ibid.*
[1904] *Ibid.*

the data. But sometimes it also means that we suggest certain kinds of data that they should try to get »[1905].

C'est doublement asymétrique dès lors que les biologistes posent au physicien les questions, mais en même temps, puisqu'ils ne sont pas censés connaître et manipuler les outils mathématiques, le physicien garde la maîtrise des modèles mathématiques. Sauf quand il publie dans des journaux de mathématiques appliquées ou de physique, Krug doit s'adapter au public biologiste auquel il a dû apprendre à s'adresser :

« This is something that of course I have had to learn when writing papers. This is an important cultural difference. Physics is a strongly mathematical science. [...] So you write equations, people can read equations [...] Biology is not like that, because there is no theoretical biology, there's no standard mathematical curriculum that all biologists learn, so when you write a biological paper, all the statements have to be sort of translated into normal language. You cannot rely on equations. And this sometimes is difficult, because you have some specific mathematical statement and then they ask, what does it mean biologically ? [...] Sometimes the mathematics is hidden in the back of the paper. The key messages have to be presented either visually by graphs or in words »[1906].

Pour Krug, le *travail de démarcation* scientifique n'est pas un écueil insurmontable : « You have to sort of try to address different communities, by different means, but I don't think it's a big problem »[1907]. De par sa connaissance de la biologie, Krug n'appartient pas à la catégorie des *traducteurs*. Ceux-ci ont, vis-à-vis des autres disciplines, la même attitude d'esprit de service que les *bilingues*, mais à la différence de ces derniers ils ne considèrent pas utile que de s'approprier le langage des domaines auxquels ils contribuent.

Les traducteurs

Les *traducteurs* se différencient des *bilingues* de par leur connaissance limitée des disciplines auxquelles ils s'adressent[1908]. Nous n'avons d'ailleurs pas utilisé le pluriel « disciplines » par hasard. Les scientifiques relevant de cet idéaltype n'ont pas besoin de connaître dans les détails les domaines auxquels ils s'adressent, alors ils peuvent parler à un plus grand nombre de cultures différentes. Les *traducteurs* traduisent des données issues d'autres domaines que le leur dans une langue, qu'ils maîtrisent, pour faire dire à ces données des choses que les scientifiques ou les organismes les ayant produites ne leur font pas dire. Vu autrement, les *traducteurs* appliquent un modèle à

[1905] *Ibid.*
[1906] *Ibid.*
[1907] *Ibid.*
[1908] Sans jugement de valeur.

plusieurs matériaux différents, pour produire une connaissance inédite. Ils donnent à ces données une forme différente.

Si le *bilingue* Krug connaît un secteur précis de la biologie de manière approfondie et s'il ne travaille qu'avec des biologistes, les *traducteurs* peuvent, quant à eux, se passer d'une connaissance des problématiques, des cadres épistémiques, méthodologiques et ontologiques spécifiques des disciplines pour lesquelles ils travaillent. Ils peuvent aussi se passer de la collaboration avec les spécialistes des données qu'ils exploitent. Krug peut travailler en solitaire, plus souvent par rapport aux *transfrontaliers*, aux *ambassadeurs* et aux *polyglottes* ; il rencontre pourtant régulièrement ses collègues biologistes, avec qui il écrit la plupart de ses travaux. Un *traducteur* en revanche peut travailler dans la solitude et, en même temps, penser de se rendre utile aux collègues appartenant à d'autres cultures scientifiques. Un cas paradigmatique issu des SSC concerne les physiciens statisticiens spécialistes des réseaux, qui travaillent sur des bases de données différentes, provenant des disciplines les plus diverses. On parle de *traducteurs* dans leur cas, car il s'agit de scientifiques qui maîtrisent un éventail d'outils mathématiques et computationnels, qu'ils appliquent à des bases de données concernant les thématiques les plus inhomogènes : à l'ère du *Big Data*, il existe des *datasets* de scientométrie, de trafic citadin, d'épidémies, de systèmes immunitaires, de dynamiques d'opinion, et de bien d'autres objets d'étude, qui sont à la disposition de quiconque veuille les analyser. Sans le besoin de connaître la sociologie des sciences, l'urbanisme, l'épidémiologie, l'immunologie ou la politologie, ces physiciens se proposent, de par leurs moyens théoriques, de rendre compte de certaines structures mathématiques inhérentes à ces bases de données. Ensuite, ils en proposent des lectures qu'ils espèrent heuristiques, plus pour les spécialistes des domaines auxquels appartiennent ces objets qu'à leur propre communauté de physiciens, sauf s'il y a aussi un questionnement mathématique qui va avec l'analyse des données.

Un de nos interlocuteurs américains décrit bien cette démarche ; il s'agit d'un physicien des réseaux qui considère la nécessité d'avoir les « bonnes lunettes » pour résoudre des problématiques dans d'autres domaines :

> « So before I talked to [my colleague biologist] I knew nothing about this problem and now after I talked to him I felt like I think I know how to solve this model. So […] looking at the world with the right glasses is one important thing and then having enough tools that you can actually do something significant »[1909].

Ce physicien parle ensuite d'un problème géologique et du sentiment qu'il a de pouvoir contribuer à l'expliquer : « even though I don't know any geology or geophysics it just seems like this cries out for a physics explanation of all this large

[1909] Entretien avec anonyme.

scale organization »[1910]. Si Krug théorisait le fait qu'en s'approchant d'un domaine qui n'est pas le sien, il lui fallait en avoir saisi au moins les débats en cours, pour notre interlocuteur *traducteur* connaître le domaine auquel il s'adresse n'est pas seulement superflu mais risque même d'être contre-productif :

> « I'm a person who likes really simple models […] really simple means you can explain to a ten years old what the model is. Maybe you can't solve it easily but at least formulate it so […] I would have to say that I haven't gone that deeply into other fields to learn the literature, the state of the art. Because I think that actually learning the literature in some other fields sometimes that's a recipe for death, because then you get stuck in all the details and then you get inculcated with the mindset of another field and with what they think is possible and what's not »[1911].

L'une des convictions qui permettent aux *traducteurs* de faire ce qu'ils font repose sur l'homologie qu'ils présupposent à propos des différents systèmes qu'ils analysent. Quelle que soit la sphère ontologique spécifique des différents objets d'étude, à partir du moment ils peuvent être pensés comme des réseaux, ils *sont* des réseaux. L'*abstract* d'un article scientifique sur les réseaux spatiaux écrit par un physicien français le montre bien :

> « Complex systems are very often organized under the form of networks where nodes and edges are embedded in space. Transportation and mobility networks, Internet, mobile phone networks, power grids, social and contact networks, neural networks, are all examples where space is relevant and where topology alone does not contain all the information. Characterizing and understanding the structure and the evolution of spatial networks is thus crucial for many different fields ranging from urbanism to epidemiology. […] We will expose thoroughly the current state of our understanding of how the spatial constraints affect the structure and properties of these networks »[1912].

Notre interlocuteur américain exprime la même idée encore plus efficacement : « I guess the thing is that once the network cat was out of the bag, lots of things looked like networks, if you have the right perspective »[1913].

Conclusion

[1910] *Ibid.*
[1911] *Ibid.*
[1912] Barthélemy, M., « Spatial networks », *Physics Reports*, 2011, vol. 499, n.1-3, pp. 1-101.
[1913] Entretien avec anonyme.

Il peut sembler curieux de citer ici Louis Althusser, mais en 1974 le marxologue de la rue d'Ulm écrivait que « l'interdisciplinarité est aujourd'hui un mot d'ordre très répandu, dont on attend la solution de toutes sortes de problèmes, en suspens dans les sciences exactes (mathématiques et sciences de la nature), les sciences humaines, et d'autres pratiques »[1914]. Si le phénomène est perçu de longue date, la littérature, normative et analytique, qui porte sur le dialogue entre les disciplines offre peu de typologies des formes du travail scientifique interdisciplinaire. Ce chapitre s'est proposé de suppléer à ce manque, en tirant profit du terrain des SSC et de domaines similaires comme les systémiques.

Osons ici une comparaison entre la démarche suivie ici-même et les approches développées par d'autres auteurs dans des travaux similaires au nôtre. Dans la section sur la revue de la littérature, nous n'avons pas cité deux articles qui proposent des classifications des formes de l'interdisciplinarité alternatives à celle présentée ici, tant dans l'approche que dans le rapport au volet axiologique. Essayons de mieux spécifier, par contraste, la nature de notre propre classification des modalités du travail scientifique interdisciplinaire.

Ayuko Sedooka et ses collègues ont récemment proposé une classification des rapports individuels que les chercheurs et les chercheuses disent avoir par rapport au cadre disciplinaire qui est le leur[1915]. En tirant profit de la réflexivité de leurs interviewés et en adoptant l'approche de la sociologie de l'identité, ces auteurs sont parvenus à six profils disciplinaires sous forme d'idéaux-types wébériens. D'après leur analyse, l'« identité disciplinaire » concerne ces scientifiques qui, tout en dialoguant avec des disciplines différentes, « affirment explicitement un ancrage disciplinaire »[1916]. L'« identité thématique » regarde ces chercheurs et chercheuses qui s'identifient avec une aire ou un objet d'étude plus qu'avec une discipline, cette aire ou objet d'étude demandant à être analysé par plusieurs savoirs : c'est le cas des *gender studies*, des *postcolonial studies*, des *sciences studies*, etc. L'« identité hybride » concerne les scientifiques ayant conduit leur formation à cheval entre deux disciplines, en les hybridant dans une nouvelle approche ou discipline : on pourra penser à la psychosociologie, à la socio-anthropologie ou à la neuroéconomie. La figure de l'« interdisciplinary native », calqué sur la formule du *digital native*, concerne « le chercheur ayant une trajectoire interdisciplinaire dès l'origine de sa formation de base, sans ancrage disciplinaire fixe et dont les intérêts portent sur des domaines scientifiques incluant un large spectre de disciplines différentes »[1917] : cela peut être le cas des politistes ou des modélisateurs numériques. La cinquième catégorie, celle de l'« interdisciplinary migrant », désigne « le plus souvent de[s] chercheurs confirmés

[1914] Althusser, L., *Philosophie et philosophie spontanée des savants (1967)*, Paris, François Maspero, 1974, p. 28.
[1915] Sedooka, A., Steffen, G., Paulsen, T. & Darbellay, F., « Paradoxe identitaire et interdisciplinarité: un regard sur les identités disciplinaires des chercheurs », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, vol. 23, n. 4, pp. 367-377.
[1916] *Ibid.*
[1917] *Ibid.*

ayant une origine disciplinaire, mais qui s'ouvrent progressivement à l'interdisciplinarité par emprunt et circulation entre les disciplines au cours de leur trajectoire académique »[1918]. Enfin, le profil de l'« indiscipliné » concerne ces chercheurs et chercheuses qui dépassent les ancrages disciplinaires, souvent pour assumer un regard d'ensemble ou systémique. Ces six catégories recoupent plusieurs des nôtres[1919], mais ne se posent pas sur le même niveau d'analyse. Tant l'approche de Sedooka et de ses collègues que celle employée ici sont inductives, mais si la leur parvient aux six idéaux-types à partir des récits identitaires que les interviewés font d'eux-mêmes, la catégorisation illustrée dans ce chapitre est de notre ressort analytique.

Le deuxième article pertinent pour notre propos a été écrit par deux urbanistes, Gabriel Dupuy et Lucien Gilles Benguigui, lesquels se proposent d'examiner les différentes formes que l'interdisciplinarité peut prendre dans leur domaine[1920]. La première forme qu'ils identifient est celle de l'« interdisciplinarité passive ». Elle indique un cas de multidisciplinarité dans laquelle plusieurs savoirs concourent à un objectif commun (l'aménagement de la ville), mais sous la direction d'un « chef d'orchestre », qui opère une synthèse et une hiérarchie entre les domaines convoqués : les sciences secondaires viennent donc à subir l'interdisciplinarité de manière passive. L'« interdisciplinarité naïve » concernerait ces scientifiques extérieurs à l'urbanisme (tels les physiciens ou les informaticiens) qui, sans en avoir une connaissance solide, y contribuent avec des études, des approches et des outils qui finissent par être acceptés par les urbanistes « à la longue et au compte-gouttes »[1921]. L'« interdisciplinarité transitive » consiste en une collaboration assumée, constante et active entre des urbanistes et des mathématiciens, des physiciens ou des informaticiens, pour le développement de nouveaux outils à intégrer de manière stable au domaine. L'« interdisciplinarité offensive » indique, enfin, des « mises en causes frontales »[1922] de l'urbanisme de la part d'urbanistes définis par les auteurs de l'article comme des « positivistes » qui visent à destituer tous les savoirs qui ne seraient pas quantitatifs ni scientifiquement démontrés. Or, au-delà du domaine spécifique de l'urbanisme, il est évident qu'une telle classification est de nature éminemment épistémique et normative. C'est la raison pour laquelle nous ne voyons pas de recoupements possibles avec la classification proposée ici.

[1918] *Ibid.*

[1919] L'« identité thématique » peut s'appliquer aux *transfrontaliers*, aux *polyglottes* ou aux *bilingues*. L'« identité disciplinaire » n'est pas forcément remise en cause par les scientifiques classifiables dans nos cinq catégories. Quant à l'« identité hybride » et à l'« interdisciplinary native », il s'agit de deux idéaux-types pouvant recouper à la fois par l'*ambassadeur*, le *polyglotte* et le *bilingue*, tandis que l'« interdisciplinary migrant » est une identité qui peut être revendiquée par tous nos idéaux-types sauf par le *traducteur*. Enfin, l'identité de l'« indiscipliné » peut être plus facilement revendiquée par le *polyglotte* et plus difficilement par le *traducteur*, mais elle peut l'être aussi par les autres.

[1920] Dupuy, G. & Benguigui, L.G., « Sciences urbaines : interdisciplinarités passive, naïve, transitive, offensive », *Métropoles*, 2015, n. 16 : http://journals.openedition.org/metropoles/5107.

[1921] *Ibid.*

[1922] *Ibid.*

Architecture et interdisciplinarité

Des historiens et des sociologues se sont intéressés à l'influence de l'architecture des bâtiments et de l'organisation des villes sur les comportements sociaux et politiques. C'est le cas de l'historien des sciences Langdon Winner, dans son article intitulé « *Do artifacts have politics ?* ». Il y défend la thèse selon laquelle certains dispositifs technoscientifiques incarnent et engagent intrinsèquement une certaine forme sociopolitique (l'énergie nucléaire, par exemple, nécessitant un État centralisateur doté d'une armée pour en assurer la défense)[1923]. On peut aussi citer l'article classique de Pierre Bourdieu, « *Le mort saisit le vif* », dans lequel le sociologue soutient que l'histoire des rapports de forces s'inscrit dans les choses, pas seulement dans les corps, en augmentant ainsi la part d'irréversible et d'inertiel avec laquelle doivent compter ceux et celles qui voudraient les changer[1924].
Dans un livre collectif intitulé *The architecture of science*, l'historien des sciences Peter Galison se demande quel type d'influence exerce l'architecture sur les sciences et réciproquement : « How do the buildings of science literally and figuratively configure the identity of the scientist and scientific fields ? Conversely, how do the sciences procedurally and metaphorically structure the identity of the architect and the practice of architecture ? »[1925]. La thèse du livre est claire : l'architecture fait partie de la culture, au sens où elle incorpore et à la fois transmet des éléments de pratiques, de savoirs, de pouvoirs, de métaphysique, de normes, etc. :

> « There is also a psychological-sociological side of the question : How does the architecture act as a guiding, daily reminder to practitioners of who they are and where they stand ? […] Architecture can therefore help us position the scientist in cultural space ; buildings serve both as active agents in the transformation of scientific identity and as evidence for these changes »[1926].

Dans les discours sur l'interdisciplinarité, qu'ils soient promoteurs ou analytiques, il y a peu de réflexions sur le rôle de l'architecture dans le travail scientifique interculturel. Même si le questionnement sur la manière d'encourager, de faciliter et d'implémenter l'interdisciplinarité existe, il porte le plus souvent sur le rôle des métaphores, sur la création de langages pidgins ou bien sur la nature des outils méthodologiques à employer pour asseoir un dialogue. L'un des aspects intéressants des SSC réside dans le fait que les chercheurs et les chercheuses s'y inscrivant mènent une réflexion

[1923] Winner, L., « Do artifacts have politics ? », *op. cit.*
[1924] Bourdieu, P., « Le mort saisit le vif », *op. cit.*
[1925] Galison, P., « Buildings and the subject of science », dans Galison, P. & Thompson, E., *The architecture of science*, Cambridge, MIT Press, 1999, p. 1.
[1926] *Ibid.*, p. 3.

explicite et militante sur l'architecture des instituts qu'ils ou elles mettent en place. Le conseil d'administration du SFI a par exemple organisé une consultation par questionnaire auprès des membres du centre, afin qu'ils décrivent leur composition idéale de ce qui deviendra plus tard le *Cowan Campus*. Pareillement, lors de la première phase de vie institutionnelle sous la forme de GIS situé rue Lhomond, ou lors de la phase de stabilisation sous la forme d'UPS rue Nationale, l'ISC-PIF a été conçu pour encourager, de par sa structure interne, les échanges entre logiques disciplinaires différentes. Si le SFI, dans sa structure finale, présente beaucoup de petits bureaux individuels ou partagés et peu de grands espaces communs et conviviaux, l'ISC-PIF a d'abord été conçu comme une sorte de start-up informatique juvénile, dynamique, auto-organisée et sans barrière hiérarchique. C'est par la suite qu'il a évolué vers la forme d'un incubateur multi-étages apte à produire des croisements grâce à sa « convection » interne.

Le but de ce chapitre n'est pas de discuter la thèse générale de Galison sur les influences réciproques entre les scientifiques et leurs bâtiments, mais plutôt de la prendre comme appui pour enquêter sur la réflexivité des scientifiques à propos de ce que nous appelons ici l'*ingénierie de l'interdisciplinarité* et pour en décrire les pratiques associées. Si l'architecture n'est pas le facteur qui fait naître les collaborations interdisciplinaires, elle contribue à les entretenir.

Le SFI

Depuis le début de son histoire, le SFI a toujours mis en avant le rôle de l'architecture dans l'encouragement d'une certaine manière de faire science. Comme le disait le premier vice-président de l'institut Mike Simmons dans un entretien publié dans un bulletin de 1990, la future structure du centre aurait dû être invisible : « The structure must be carefully thought out and arranged to encourage the most productive scientific interactions, but it must also be unobtrusive, almost invisible to the scientific participants »[1927]. L'architecture est visée comme l'un des éléments pouvant multiplier les idées et les échanges : « With inspiration and effort a scientific institution can be designed and nurtured to encourage creativity and communication and to make it possible for the participants to work more productively »[1928]. Cela n'est pas étonnant, si l'on se rappelle du parcours des fondateurs du SFI : il s'agit de scientifiques ayant travaillé dans l'un des rares laboratoires américains, le Los Alamos National Laboratory, où il est possible de réaliser tout le processus technoscientifique, à partir de la recherche dite fondamentale jusqu'à la construction concrète de dispositifs technologiques. Dans *Image and Logic*, Galison avait déjà dédié plusieurs pages à la manière dont les physiciens, les ingénieurs, les chimistes et les décideurs politiques

[1927] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 10.
[1928] *Ibid.*

avaient réfléchi – non sans divergences – à l'organisation des espaces de travail du LANL, pour que les échanges soient plus rapides et les opérations plus efficaces. Dans un bulletin du SFI de 2004, George Cowan dit avoir appris au LANL les méthodes pour une « ingénierie sociale » du travail interdisciplinaire :

> « [Some interdisciplinary encounters he had in the 1950s] stayed with Cowan, and their impact compounded when he became head of Basic Research at Los Alamos National Laboratory (LANL). There he oversaw not only work in the exact sciences such as physics and chemistry, but also less structured ones such as biology and new fields such as molecular biology. It was there he learned the power of what he calls 'social engineering'. 'You don't tell people what to do, you get them involved and interested', he says. 'I found myself being a marriage broker', he adds, 'getting good people together to do exciting things' »[1929].

Les institutions qui ont fourni l'inspiration aux fondateurs du SFI sont l'Aspen Center for Physics, l'Institut of Advanced Studies de Princeton et le Jonas Salk Institute. Pour ce qui est du premier, selon Simmons, les ressemblances avec le SFI portent notamment sur la sélectivité et la possibilité d'échanges intenses et informels, donnant naissance à des collaborations entre scientifiques appartenant à des institutions différentes[1930]. Le souhait de Simmons était que le SFI devienne, comme l'Aspen, un lieu où les scientifiques puissent retourner de temps en temps pour renouveler leurs idées, avec la différence que le SFI n'est pas uniquement branché sur la physique. Avec l'IAS de Princeton, le SFI partage le fait qu'il n'y a pas de diplômes ni de laboratoires et que les associés conduisent leur recherche avec une liberté relative. Quant au Salk Institute, Cowan relate que la biologie moléculaire avait représenté pour les fondateurs un modèle réussi d'interdisciplinarité. Pour cela, il s'inspira de ses statuts et de ses dirigeants : « [Molecular biology] was the model home of the emerging syntheses. I quickly obtained the charters and bylaws of the Salk Institute and spoke with its founders and directors »[1931].

La planification de l'interdisciplinarité

L'assistante de gestion Ronda Butler-Villa, l'un des membres les plus anciens du staff du SFI, explique que, lorsque celui-ci devait faire son quatrième et dernier déménagement, la Direction interpella les scientifiques, les gestionnaires et les employés afin de savoir quelles étaient les caractéristiques qu'ils auraient aimé retrouver dans le *Cowan Campus* :

[1929] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2, pp. 3-4.
[1930] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1, p. 9.
[1931] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 0.

« There was something called the ‘Program’, done when we were in the intern space, after the convent. With contributions from scientists, management, staff, the visitors. How big, how many parking places, very pragmatic. Then they found the place that could meet those criteria »[1932].

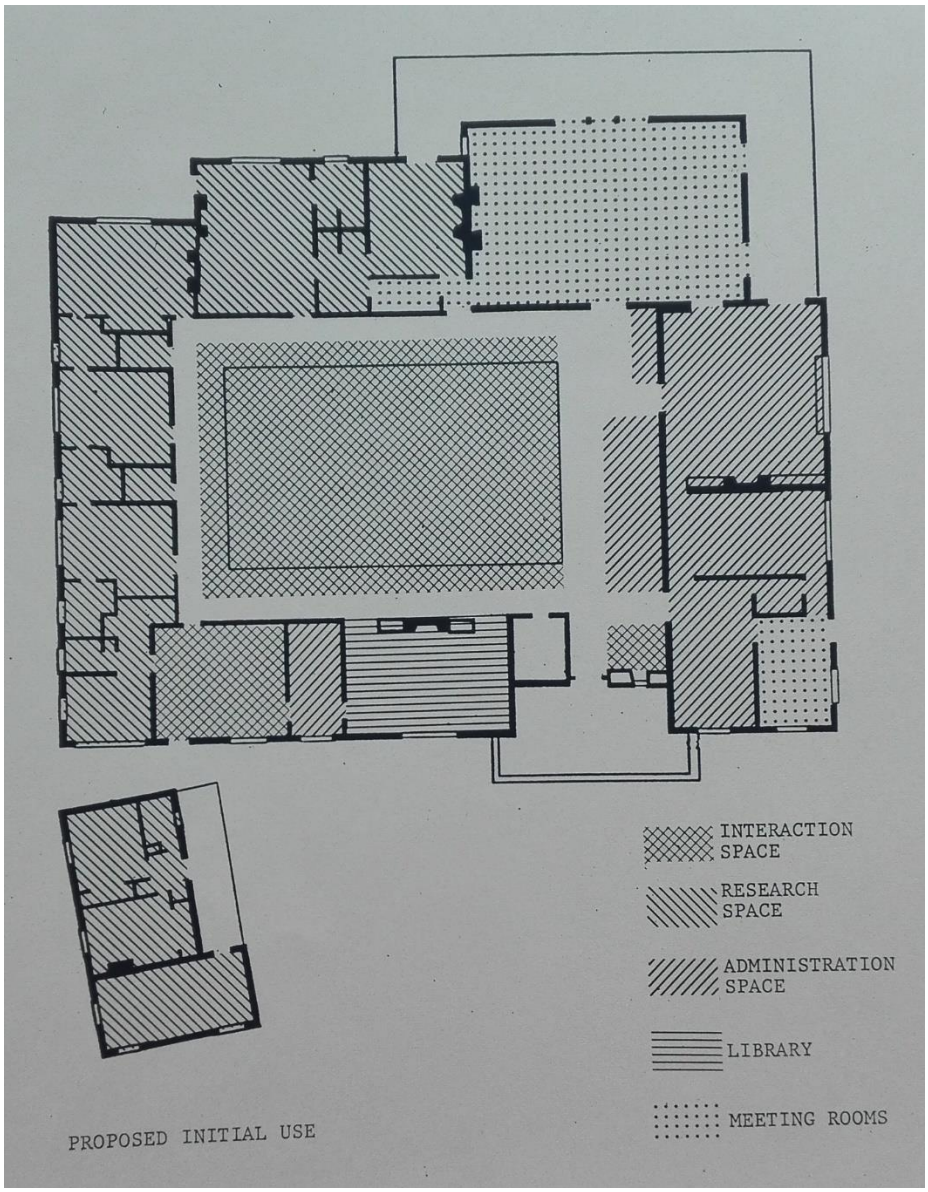


Figure 12. Plan du Cowan Campus : SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d’archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus »

L’expérience du premier siège de l’institut, le couvent, avait marqué les esprits, parce que le manque d’espace produisait des contacts informels qui favorisaient précisément les collaborations interdisciplinaires. Dans les intentions de la Direction du SFI, le *Cowan Campus* devait maintenir le même esprit que le couvent, tout en fournissant des

[1932] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.

espaces plus aptes à accueillir la vie sociale de l'institut qui entretemps s'était accrue (les associés ayant passé de vingt à plus de cent) :

> « The special qualities of the convent that served as the Institute's first headquarters have left an indelible impression of mythical proportion upon the collective memory of the Institute. As the new headquarters are modified and expanded every effort must be made to develop and maintain the sense of camaraderie and comfortableness that the convent had »[1933].

Le bulletin du SFI de l'hiver 1996-1997 présente la nouvelle structure en mettant en lumière la taille plus grande et la fonction qu'elle aura dans l'encouragement de la collaboration entre représentants de sciences différentes : « The expansion – 9.260 square feet of space from the south of the main building – will complement SFI's best feature : its collaborative, multidisciplinary approach to scientific research »[1934]. Mais comment la collaboration est-elle encouragée ? La figure 1 montre que le point fondamental est représenté par la présence de bureaux petits et partagés, couplés à des grands espaces communs censés faciliter les échanges : « Shared offices will surround three common areas so that group discussions can facilitate individual work »[1935]. En particulier, la planification de la structure définitive du SFI s'inspire de la méthode « caves-and-commons », inventée par Marvin Minsky dans les années 1960 et appliquée au MIT, et aujourd'hui en vogue dans le monde des entreprises, notamment informatiques[1936]. Dans cette logique, les espaces communs doivent être confortables et bien équipés : notre visite du SFI a confirmé en effet que les différents étages du centre contiennent de grands tableaux, de grands canapés, des tables et plusieurs librairies. Les vitres dominent, non seulement les murs qui séparent l'interne de l'externe du laboratoire, mais aussi les murs des bureaux, pour faire en sorte de créer un contact visuel entre les scientifiques et ceux qui passent à travers les espaces partagés :

> « More specifically, the south wing will use what is called an interior-street floor plan and a caves-and-commons approach. The caves-and-commons approach groups small offices around a large space that contains tools and other amenities that are to be shared. The interior-street floor plan uses a wide corridor, with shared amenities, that links the long building into a whole. Most of the new rooms will be 10 by 16 feet. These rooms will serve as offices for one single senior or long-stay occupant, offices for two junior or short-stay occupants, or small meeting rooms.

[1933] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[1934] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, p. 24.
[1935] *Ibid.*
[1936] Brand, S., *How Buildings Learn. What happens to them after they're built, Londres,* Penguin, 1995.

> Such rooms can also be divided with an added wall into two small private offices opening onto the commons. All offices and meeting rooms will take advantage of natural light from the outside through operable windows and from the skylight interior street or commons. The interior windows will allow small-room occupants to see what is going on in the common areas, and passersby on the interior street will be able to observe when someone is in his or her office. The exterior layout of the wings will also provide niches and portals for interaction outdoors during warm weather »[1937].

Un rapport interne du SFI illustre les opinions différentes qui se sont manifestées lors des entretiens que la direction a conduits avec des « membres sélectionnés » du conseil scientifique, du corps des associés externes et de celui des membres permanents du staff[1938]. Ces entretiens ont permis au SFI de parvenir à des décisions sur comment organiser l'espace du *Cowan Campus,* en termes de personnes par bureau ou de séparation ou proximité entre staff et scientifiques :

> « The most controversial element of the Institute is the office for both staff and for researchers. For researchers there was a range of opinions voiced during the programming process. […] The opinions range from the wish to differentiate office type and size among the various kinds of researchers (external faculty, post doctorals, graduate students, etc.) to the nature of the office itself. One said that 'not all work stations are equal' while another said that 'all offices should be alike'. One said that 'the office needs peace and quiet…' while another said 'it should be a place to maximize contact'. Despite the range of opinions, it was considered appropriate for two researchers to share an office and for up to six students to share an office. Integrally associated with this idea, however, was the need for collaboration tools where research teams could meet. Such rooms would be in addition to interaction areas where researchers would meet on a more informal basis. […] There was a general consensus, however, that separating administrators from researchers was contrary to the Institute's spirit of interaction »[1939].

Quelques temps auparavant, le SFI avait déjà essayé d'acheter la résidence Hurley[**1940**]. L'une des raisons de cet intérêt concerne les espaces externes à l'institut, le contexte dans lequel elle s'insère. L'isolation dans les collines de Santa Fe en ferait un lieu propice à la concentration : « The Hurley estate is appealing to us for many reasons.

[1937] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1, pp. 24-25.
[1938] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[1939] *Ibid.*
[1940] SFI, « Abell Presentation to Board of Adjustment », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

We value the open land and the freedom from distractions it permits »[1941]. La philosophie qui doit régner à l'intérieur du SFI est celle d'un lieu d'interactions incessantes : « Interaction is the Institute's primary activity. Interaction permeates everything »[1942]. Cette déclaration d'intentions a été partiellement concrétisée par la dissuasion d'un usage individualiste des bureaux : « In these discussions it was generally agreed that private offices were contrary to the spirit of interaction that characterizes the Institute »[1943]. Même le nombre des accès à la structure a été pensé à des fins interactionnelles : maintenir le nombre de portes au minimum réduit les points de passage et oblige les personnes à se rencontrer plus souvent : « The expansion of existing structures will necessitate the development of several entrances. The number of entrances should be held to a minimum in order to maximize interaction among the participants of the Institute »[1944]. La direction de l'institut a cependant veillé à séparer les activités bruyantes des activités silencieuses : la salle des conférences, la cuisine et les tables à manger sont en effet concentrées dans le premier *pod*. Les autres *pods* doivent fonctionner surtout comme lieux de rencontre et de collaboration. Notre visite de l'institut a fait apparaître un usage assez intensif des bureaux individuels ou (plus souvent) collectifs, avec des activités menées en général de manière solitaire devant un ordinateur. C'est ce dont la bibliothécaire historique du SFI, Margaret Alexander, témoigne dans l'extrait d'entretien suivant – et nous l'avons observé également par rapport à un nombre plus restreint d'individus, qui profitent des grands espaces et des grands tableaux pour discuter longuement : « The pods are supposed to be so that you could go out in the middle of the pod and sit down and talk. And it works. People do that a lot. Usually when you walk down there, somebody is out on the couches at the whitebord and talking and going over things »[1945]. Alexander toutefois porte notre attention sur un aspect plus invisible : le rôle de la nourriture et du thé dans la socialisation scientifique de l'institut. Les voisins du SFI avait accepté la présence de l'institut dans leur zone résidentielle à condition que le repas soit servi en interne, afin d'éviter que les scientifiques prennent leurs voitures pour aller déjeuner en ville tous les jours. De nécessité vertu : le dispositif gastronomique, ainsi que le thé de l'après-midi, ont ensuite été intégrés dans les stratégies de l'*ingénierie interdisciplinaire* du centre :

> « I'm sure the pods were designed with the science we wanted in mind. But I have to tell you : the key to our science is food. It started with people in the neighborhood were really against us moving here. They wanted to be residential.

[1941] *Ibid.*
[1942] SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
[1943] *Ibid.*
[1944] *Ibid.*
[1945] Entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.

> We went to the city council to get a variation in the zoning, so we could have this. So we had people testifying what a wonderful institution [SFI] was. So one of the compromises we made was we serve lunch up here, because if we didn't serve lunch, everybody would get into their cars and drive downtown and have lunch. Which would create a lot of traffic right ? At the beginning lunch was free. Pasta and salad every day. We did a lot of different configurations before we got into what it is now, somebody cooking in one place and bringing everything. We have a different restaurant every day, rotating. Then Harold Morowitz decided we had tea every day. Food brings people together and they got out of the offices and they eat. Tea, food, the pods, making sure we have comfortable places for them to talk »[1946].

Butler-Villa explique également que la machine à café est située dans le premier *pod*, pour contraindre les chercheurs et les chercheuses à parcourir le chemin des différents étages et à se rencontrer éventuellement à un même endroit : « The initial idea was to have very few personal offices. The coffee was put very far, so to oblige people to have a long way before getting to it. Everything was very well thought out about what they wanted to foster the actual interaction and meeting »[1947].

Où s'engendre donc l'interdisciplinarité ?

Une fois décrits les discours du SFI quant aux stratégies en matière d'*ingénierie de l'interdisciplinarité*, il reste à voir les lieux où, et les modalités par lesquelles les échanges interculturels se génèrent effectivement. Le lieu le plus important pour l'institut américain nous semble être le dispositif du *workshop*. À mi-chemin de la conférence et de l'école d'été, le *workshop* du SFI se distingue des deux premières pour sa longueur : durant souvent une semaine, quelques fois même deux. Ces ateliers voient deux ou trois dizaines de scientifiques appartenant à deux, voire à plusieurs disciplines différentes, collaborer sur un temps long, avec l'objectif explicite de trouver de nouveaux concepts, de nouvelles méthodes, de nouveaux langages, pour produire de nouveaux savoirs. Parfois cela peut être « trouver la définition des systèmes complexes », parfois cela peut être « décliner le concept de robustesse dans plusieurs domaines », parfois cela peut être « étudier l'infectivité avec des méthodologies diverses ». Dans tous les cas, chaque participant intervient en informant les autres de la manière dont on traite le concept en question dans sa discipline. Ces ateliers partagent avec le dispositif de la conférence le fait que chaque participant fait un exposé. À la différence de celui-ci, dans les ateliers du SFI le *speech* est souvent libre, improvisé et sans limites temporelles strictes, tandis que le conférencier peut être interrompu à tout moment par l'auditoire. L'allocution ne marche pas comme d'habitude, où le public écoute et pose les questions seulement à la fin. Le dynamisme,

[1946] *Ibid.*
[1947] Entretien avec Ronda Butler-Villa, 03.11.16.

le bouillonnement constant, l'anticonformisme créatif sont soulignés et valorisés par les membres du SFI, qui les considèrent comme la marque de fabrique de l'institut. Par exemple le biologiste Daniel McShea témoigne de son impact avec ce style dès sa première expérience en tant qu'orateur dans un de ces ateliers : « That's when I learned how things worked here. Two minutes into my research talk, someone raised his hand and started talking »[1948]. Cette première interruption ne sera que la première d'une longue série : McShea relate avoir dû interrompre les discussions de ses auditeurs pour pouvoir finir son raisonnement. Bien qu'apparemment impolie, cette attitude est décrite par le biologiste comme hautement fructueuse :

> « After five minutes, I had to interrupt to get on with my talk. If you were a fly on the wall observing this group, you'd think they were rude, aggressive and unpleasant. But it was as exhilarating as hell for me to be in the middle of the discussion. The level of constructive complaining here is very high »[1949].

L'un des premiers ateliers organisés par le SFI fut celui qui vit des physiciens et des économistes se rencontrer pendant deux semaines, dans le but de produire de nouveaux modèles pour appréhender les marchés financiers (c'était la préoccupation du financeur du *workshop* en question, John Reed, à l'époque PDG de Citibank). Lors de ces rencontres, les débuts de ce qui plus tard sera appelé« éconophysique » furent posées. Les recherches qui en ressortirent portaient par exemple sur une application des algorithmes d'apprentissage basés sur les réseaux de neurones à des bases de données macroéconomiques, ou bien sur la construction d'un modèle économique à partir d'une analogie avec le phénomène physique de la nucléation[1950] pour aborder les motifs du changement de la fertilité de la population d'un pays[1951]. Plus tard, on verra Brian Arthur et John Holland appliquer les algorithmes génétiques et les systèmes de classeurs aux comportements d'achat et de vente dans un marché boursier, ou bien Arthur et Norman Packard appliquer les automates cellulaires à la simulation de systèmes qui évoluent sur la base du principe de la récompense[1952]. C'est donc à l'occasion des *workshops* dit « intégratifs » que les collaborations entre sciences différentes se conçoivent.

La configuration qui fut celle de cet atelier entre physiciens et économistes caractérisera la plupart des ateliers suivants, qui se suivront au rythme d'une vingtaine par an. Sauf les ateliers dédiés à la convergence entre différentes théories à l'intérieur d'une même discipline – par exemple l'écologie –, en général il s'agit pour le SFI de réunir différents spécialistes autour d'un même concept – système complexe,

[1948] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 6.
[1949] *Ibid.*, pp. 6-7.
[1950] Le terme nucléation (aussi appelé germination) désigne le phénomène d'apparition des premiers germes cristallins ou nuclei d'une phase solide ou d'un composé.
[1951] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 19.
[1952] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1, p. 6.

robustesse, infféctivité, réseau, évolution – pour parvenir à des convergences, des inter-fécondations ou de nouvelles approches à travers des séances de *brainstorming*. Nous n'observons pas un usage particulier de l'architecture dans une telle entreprise, car ces rencontres pourraient se passer dans des salles de lycée comme dans la salle de conférences du SFI, sans que cela change le type d'interactions qui y ont lieu. Le choix des participants – rigoureusement « open minded », comme nos interviewés aiment à souligner – et le cadre du *workshop* sont les éléments qui génèrent l'échange interdisciplinaire, parce qu'il est explicitement recherché.
Quelle est donc la fonction socioculturelle des expédients architecturaux arrangés par les dirigeants du SFI ? *Notre thèse est que, dans les interactions complexes entre groupes sociaux et espaces, les bâtiments servent à* entretenir *le travail interdisciplinaire plutôt qu'à le* créer. Le fait que la collaboration interdisciplinaire se génère le plus souvent ailleurs que dans les espaces conçus pour l'encourager ne doit pas induire à penser que l'architecture du SFI n'a aucun rôle sur les échanges entre ses associés. Par exemple, l'archéologue George Gumerman déclare, peu après la prise de possession du *Cowan Campus* par l'institut, que, au sein de ce dernier, les collaborations se produisent parce que l'on ne peut pas *ne pas* collaborer :

> « I wondered, écrit un étudiant de l'archéologue, if George's experience running large multidisciplinary projects 'pre-adapted' him for the kind of intense collaboration that goes on at the Institute. 'Of course', was his response. 'But you have to understand, most people here are good collaborators or else they wouldn't be here. Most of us don't even have offices, so we *have* to collaborate – there's no place to hide ! »[1953].

Dans les témoignages des membres du SFI, l'accessibilité des bureaux, et surtout la règle non-écrite mais fortement publicisée de la liberté d'interaction, permettent une facilité dans le transfert de connaissances. L'informalité est en effet un autre élément important pour entretenir le dialogue. McShea reporte avoir été traité, par ses collègues du SFI, comme un biologiste « à portée de main » ainsi qu'un consultant spécialiste de l'évolution : « People would come into my office and ask, 'When did elephants originate ?' No introductions. Of course, then I got to know them in the course of discussion »[1954]. Informalité égal liberté, absence de règles, de hiérarchies, d'horaires :

> « Roger's comment led the students to talk more about their experience as interns. In some ways they see SFI as a world without boundaries, both in terms of the concrete and the abstract. Many commented on the schedule at the Institute, where work goes on day and night. 'You might come in at one a.m. and find all these

[1953] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1, p. 13.
[1954] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2, p. 6.

people here talking', said Amy. They were somewhat surprised that everyone eats lunch together. This allows the interns to converse with 'major scientists'. They are encouraged by this kind of freedom at the Institute. 'You can even show up at someone's door and ask what they're working on', said Amy. 'I'm struck by how people communicate across disciplines here. I've never seen people working and talking together to that extent' »[1955].

Un dernier extrait d'entretien, avec lequel on conclura cette section, revient sur l'aspect physique du SFI, où les membres sont forcés de se côtoyer de par la structure du lieu. En revanche, dans ce passage, l'éconophysicien Blake LeBaron fait allusion à l'état d'esprit particulier dans lequel souvent les associés à l'institut se retrouvent : souvent en année sabbatique ou en courte visite, libérés de tous les devoirs qui leur incombent quotidiennement dans leur activité universitaire normale, ils sont prédisposés à l'interaction :

« SFI was really successful compared to other complexity tentatives. Maybe it has to have with day to day stuff, the physical architecture is designed to put people on top of other people, you share offices with random persons, you go to the same seminars, physically you are close together. These things shouldn't matter but [they do] a lot. A lot of people, I don't know if it's still true, were there to interact in interdisciplinary way. They were on sabbatical, or had some open time to expand their knowledge. They wanted to go to these seminars. You throw them back to their offices and suddenly they're busy, teaching their classes, advising their own graduate students. They want to go to a seminar and finally they're too busy to go »[1956].

Attribuer tout le pouvoir aux infrastructures serait renouer avec une position de déterminisme technologique, qui ne caractérise pas seulement les discours des scientifiques en étude, mais aussi celui d'un certain nombre de sociologues et d'historiens. De manière plus complexe, il s'agit de comprendre les relations qui existent entre nature et usage des espaces d'un côté et discours, intentions, normes et cultures affichées et mises en place par les chercheurs et les chercheuses de l'autre.
En France, l'ISC-PIF nous porte à des conclusions très semblables à celles relatives au SFI. Voyons comment.

L'ISC-PIF

[1955] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2, p. 23.
[1956] Entretien avec Blake LeBaron, 14.09.16.

L'ISC-PIF est né sous forme de GIS appuyé sur le CREA. Si les GIS sont normalement des réseaux sans siège physique propre, Paul Bourgine et ses associés avaient toutefois des projets différents pour leur institut. Leur modèle était celui des start-up de la Silicon Valley, sans barrières, sans hiérarchies, avec une ambiance informelle, apparemment anarchique[1957] – cela est du moins la narration que les associés à l'institut entretiennent.

Le premier siège de l'ISC-PIF

« Dans les [premiers] locaux de l'ISC-PIF, nous a dit Bourgine, il y a[vait] des salles de réunion. Il y a[vaient] des bureaux-mobiles : le matin, celui qui arriv[ait] pren[ait] la place »[1958]. Le dynamisme, nous a dit Romain Reuillon, se reflétait dans la disposition interne de l'institut : « La forme changeait, on réorganisait les tables selon l'occasion »[1959]. Comme le montrent les figures 2 et 3, les locaux de rue Lhomond – situés au rez-de-chaussée dans un immeuble moderne – avaient des bureaux à l'étage surélevé et un espace de *co-working* à l'étage sous-élevé, que Reuillon appelle la « fosse »[1960]. Pour David Chavalarias, directeur actuel de l'ISC-PIF, cette fosse était l'élément qui créait le lien entre les membres de l'institut[1961]. L'informaticien Mathieu Leclaire nous rapporte le discours officiel sur le rôle de l'institut, vu comme carrefour fécond, comme lieu d'interactions complexes, plus que comme laboratoire cloisonné traditionnel :

> « Comme c'est un institut qui n'a pas vocation à avoir de chercheurs en propre, il faut absolument que ça soit un lieu d'échanges, de croisements, d'interactions, absolument. Ça doit représenter un peu la science qu'il décrit, un peu du système complexe lui-même, c'est-à-dire que ça va être un lieu où il y a de l'interaction. […] ce qui se passait à rue Lhomond, c'est qu'on était toujours un peu obligés de bricoler, de mettre des bureaux un peu partout, et au final on était assez proches les uns des autres. Et ça a marché, si tu veux, le côté diffusion des savoirs, interactions, il fonctionnait dans cette espèce d'*open space* »[1962].

[1957] « Tu ne peux pas étudier l'auto-organisation sans être auto-organisé, je pense. […] étudier l'auto-organisation en étant hyper-hiérarchisé, ça ne marche pas. Et d'ailleurs, il n'y a pas d'hiérarchie ici [à l'ISC-PIF]. Il y a très peu de hiérarchie » : entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[1958] Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
[1959] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[1960] *Ibid.*
[1961] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[1962] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

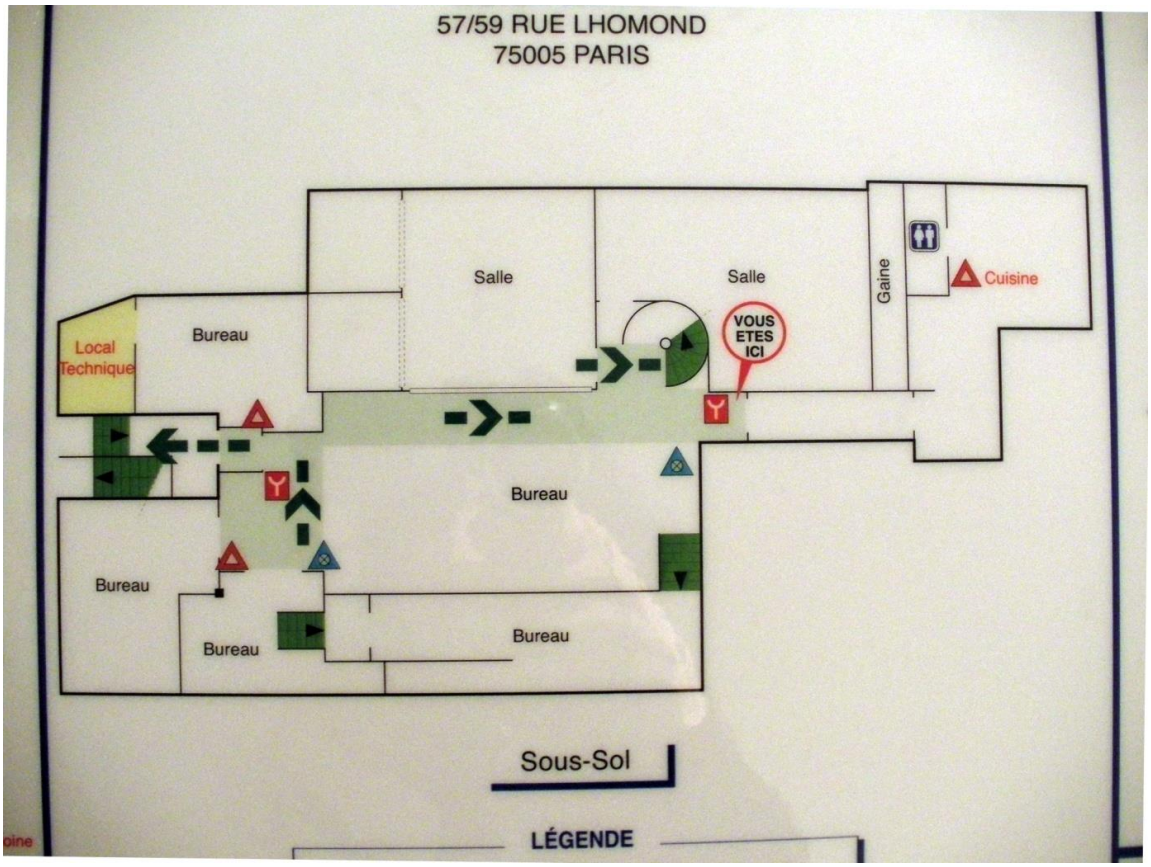


Figure 13. Plan du sous-sol du siège de l'ISC-PIF au 57-59 rue Lhomond

D'après les personnes interviewées, dans le siège de l'ISC-PIF rue Lhomond, les portes des bureaux étaient toujours ouvertes, tout le monde pouvait entendre ce que les autres disaient, y compris le contenu des conseils d'administration :

> « quand c'était Paul [Bourgine] le directeur, la porte de son bureau était toujours ouverte. Je travaillais là et j'accédais à tout ce que disait Paul. Au niveau 'interactions' c'était vraiment pas mal […] tu avais la salle de meetings, où il y avait à la fois les séminaires mais aussi les conseils d'administration qui avaient lieu au milieu de tout le monde, du coup on n'avait pas le choix que d'assister au séminaire [ou au conseil d'administration] »[1963].

Dynamisme, informalité, horizontalité : Reuillon témoigne de l'enthousiasme qu'il avait ressenti pour cette atmosphère en arrivant de Clermont-Ferrand à Paris, dans cet institut pour lui inhabituel et hyperactif :

> « Paul [Bourgine] […] prend le temps pour te connaître. C'est très sympa. Je vois que le bureau est toujours ouvert. Il y a du café en permanence, il y a des réunions en permanence. C'est un truc de fous. Les gens sont sur dix mille trucs différents.

[1963] Entretien avec Romain, Reuillon, 31.01.17.

[…] Pour moi c'est Paris. Je me dis, il y a une vraie différence de vitesse entre la recherche à Paris et la recherche en province. C'est génial. […] Je découvre toute la curiosité et c'est complètement ouvert. Les réunions se font ouvertes. C'est vraiment vraiment incroyable quoi »[1964].

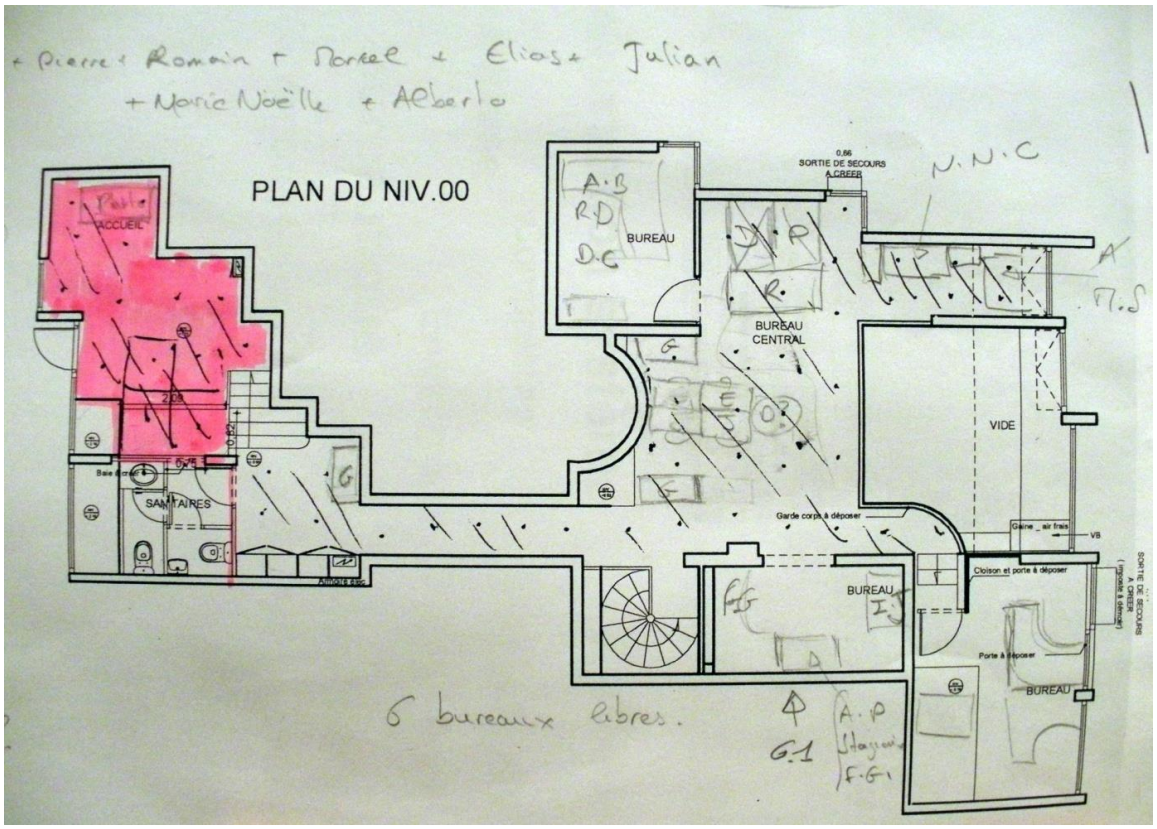


Figure 14. Plan du rez-de-chaussée du siège de l'ISC-PIF au 57-59 rue Lhomond

Reuillon n'est pas le seul à se souvenir de la première période de l'ISC-PIF avec enthousiasme. Dans le long extrait qui suit, le géographe Arnaud Banos, qui a été directeur du centre de 2011 à 2013, témoigne de sa fascination pour l'environnement « surréaliste » et « complètement ouvert » de l'institut. Cette liberté et cette passion pour leur travail manifestée par les premiers membres de l'ISC-PIF l'avait remotivé à la recherche, alors que la normativité glaçante de la vie académique l'avait déconcerté :

« il n'y avait que des gens qui étaient très bizarres. Il y avait un électronicien qui bidouillait des consoles de jeu dans son coin. Il y avait un physicien, un philosophe […] un matheux, un linguiste, à côté de cela il y avait Paul Bourgine qui courait dans tous les sens. […] je crois que c'était surréaliste qu'il y ait un lieu comme cela, ils avaient tous un pedigree incroyable tu vois, polytechnique, ENS etcetera. Ils se retrouvaient tous à faire des trucs qui avaient l'air juste incompréhensible, tout cela

[1964] *Ibid.*

vu de l'extérieur. […] Donc je suis allé leur parler à tous. Et j'ai découvert qu'ils faisaient tous des trucs passionnants. […] Et je me suis dit, 'C'est vraiment comme ça que je veux travailler'. J'en avais vraiment marre de l'académie, ils sont tous définis par la discipline, par l'institution, par machins-trucs […] [Alors que les débuts de l'ISC] c'était vraiment une époque folle quoi. Vraiment un lieu complètement ouvert où tu t'amusais la nuit, où tu mangeais des pizzas partout […] [L]a fin de ma thèse en 2001 […] correspond au moment où les instituts publics de recherche ont complètement verrouillé les choses. Avec des choses toutes bêtes mais… interdiction d'entrer dans les laboratoires la nuit, interdiction de boire de l'alcool dans les laboratoires, enfin, tout ce tas de choses qui faisaient que les laboratoires devenaient des lieux de travail pendant la journée. […] Enfin, la recherche pour moi devenait un métier chiant quoi. […] Et là j'ai découvert qu'à l'ISC, il y avait encore des niches »[1965].

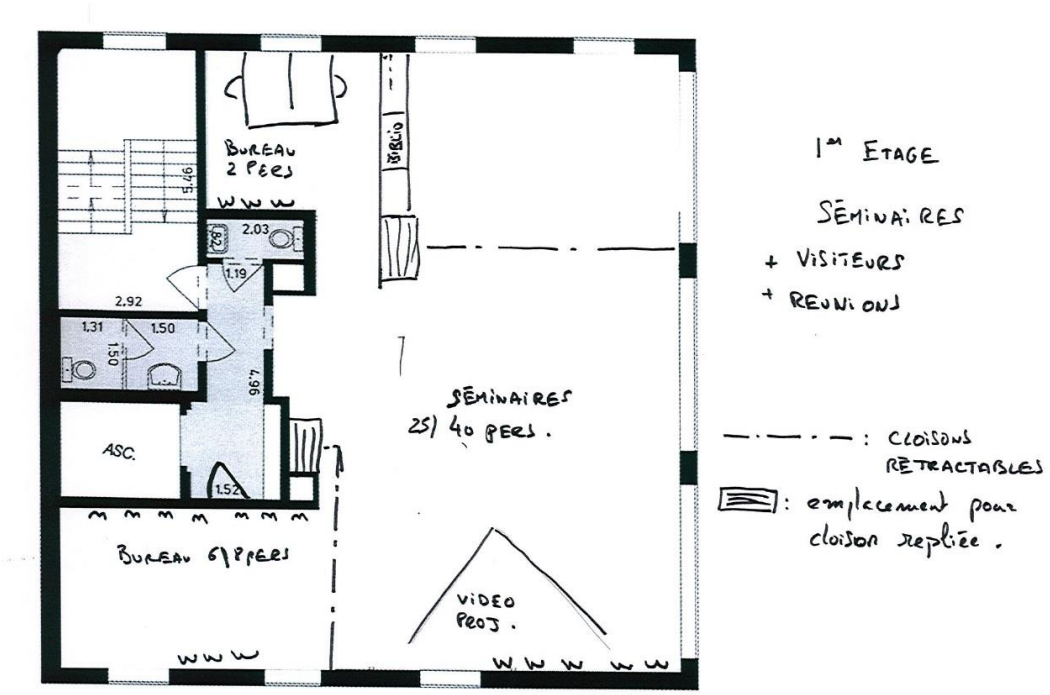


Figure 15. Plan du premier étage du siège de l'ISC-PIF au 113 rue Nationale. La configuration actuelle ne correspond pas à ce dessin : le vidéo-projecteur est tourné vers l'autre côté, la bibliothèque est absente et un mur s'érige en bas du dessin

Le deuxième siège de l'ISC-PIF

Certains associés de l'ISC-PIF regrettent la perte d'une telle ambiance, du fait du déménagement de l'institut rue Nationale, suite à sa transformation en une UPS du CNRS. Un informaticien, qui restera anonyme, dit d'avoir arrêté de fréquenter l'ISC-PIF lorsque l'« atmosphère Google » qui existait dans la première configuration a été perdue dans la nouvelle. Leclaire rappelle que le clou de la structure était un « grand *open space* » et les séminaires qui s'y organisaient étaient audibles à ceux et à celles

[1965] Entretien avec Arnaud Banos, 01.03.17.

qui travaillaient autour, ce qui était d'après lui à la fois « intéressant » et « dérangeant »[1966]. Reuillon rejoint les collègues et souligne lui aussi les avantages et les désavantages de chaque cas de figure. S'il est vrai, dit-il, que dans le cas de rue Nationale les conseils d'administration ne sont plus publics et que les séminaires se font à un étage différent de celui du *co-working*, cela a l'avantage d'assurer plus de silence et de concentration à ceux et à celles qui travaillent :

> « S'il y a une porte déjà tu te demandes si c'est public ou pas et donc déjà ça c'est un problème, et des fois on te dit tu peux t'inviter si tu veux venir mais c'est pas pareil. Moi le fait que structurellement les choses soient transparentes, et que ce soit la manière naturelle de le faire, ça me plaisait bien [même si] des fois ça avait plein de désavantages aussi au niveau du bruit et de l'isolation »[1967].

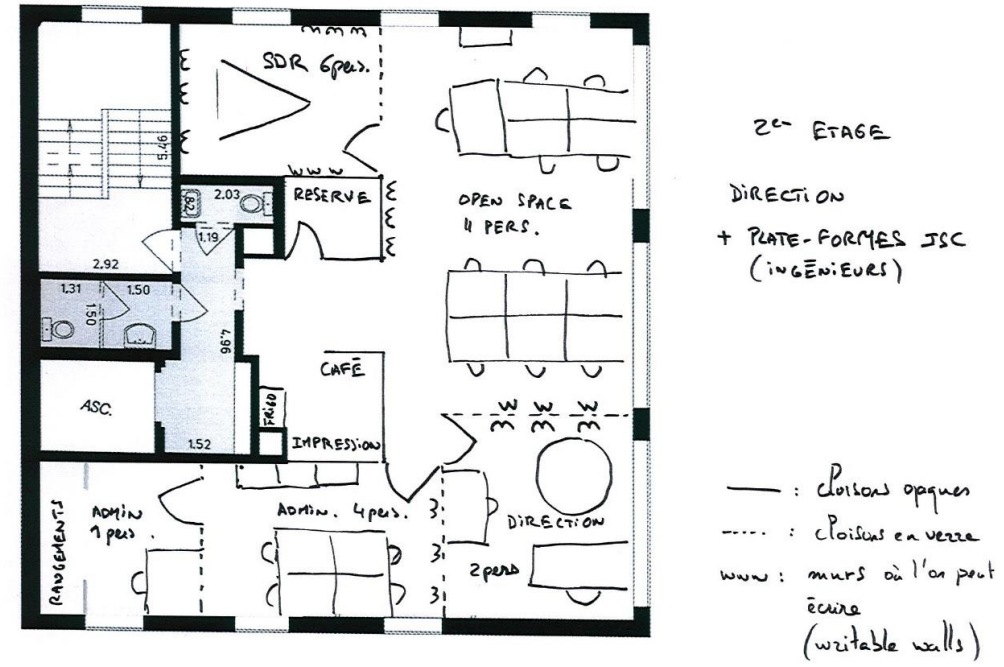


Figure 16. Plan du deuxième étage du siège de l'ISC-PIF au 113 rue Nationale

Comme son collègue, Leclaire spécifie que la perte, dans la nouvelle structure, « ça serait plutôt du côté […] administratif qu[e d]'un point de vue scientifique »[1968], même si les contraintes réglementaires ont selon lui des effets restrictifs sur la recherche également. Il prend l'exemple de la réglementation des accès au bâtiment et des horaires pour des raisons de sécurité. En général, les informaticiens de l'ISC-PIF que nous avons interrogés déplorent les encadrements en général, la culture du contrôle et du soupçon en particulier : « par défaut, on ne fait pas confiance […] Alors qu'on aimerait bien l'inverse. Par défaut on fait confiance. Si vous outrepassez la confiance

[1966] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[1967] Entretien avec Romain, Reuillon, 31.01.17.
[1968] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

qu'on vous a fait, on prend des mesures »[1969] ; en même temps, ils lamentent la perte d'une certaine forme d'auto-organisation et de liberté dans l'action scientifique, bridée par des règles administratives rigides : « il y a plusieurs fois où on a avancé des choses parce que pour nous c'était important au niveau scientifique […] on a dit : 'Non, ce n'est pas possible'. Plutôt que de dire, 'OK, pour vous c'est important, […] [c]omment faire pour que ça puisse fonctionner ?' »[1970]. La raison de ce décalage entre le GIS et l'UPS, malgré tous les deux soient des dispositifs du CNRS, est à rechercher dans le fait que rue Lhomond était un espace loué à des privés et complètement autogéré par les scientifiques, tandis que l'UPS doit suivre strictement les normes nationales établies par le CNRS. Pour Chavalarias « les gens […] se souviennent moins du côté négatif que du côté positif » de la rue Lhomond, et il énumère les avantages de la nouvelle situation institutionnelle, en termes d'espace (la surface ayant plus que doublé), en termes d'organisation (« c'est un peu moins la bricole ») et en termes de bruit (c'est moins le « Far West »)[1971]. Le directeur de l'institut explique en revanche que la taille plus grande limite la « circulation entre les gens »[1972].

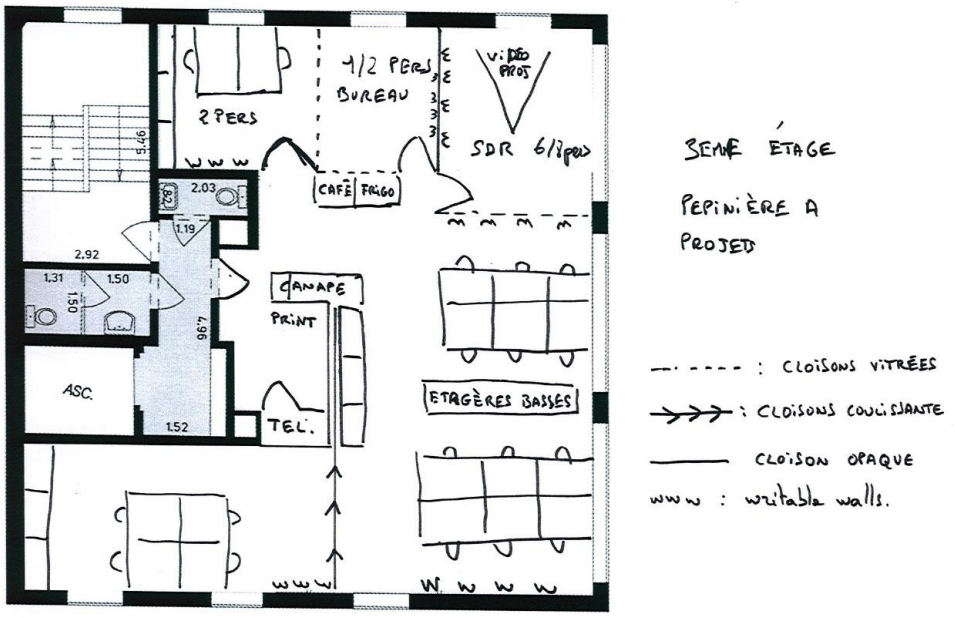


Figure 17. Plan du troisième étage du siège de l'ISC-PIF au 113 rue Nationale. Ce plan ne correspond pas à l'actualité, car il ne contemple pas la petite salle de réunions-bibliothèque, ni la salle de récréation

La planification de l'interdisciplinarité

Ces différences mises à part, une chose commune tant au premier siège de l'ISC-PIF qu'au deuxième existe et c'est la réflexion sur le rôle de l'architecture. Dans les deux cas, les entrepreneurs scientifiques se sont retrouvés face à des bâtiments déjà-là : ils

[1969] *Ibid.*
[1970] *Ibid.*
[1971] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[1972] *Ibid.*

n'ont pas pu les construire *ex novo* comme ce fut le cas pour le SFI – même si cela s'est passé dans les contraintes posées par les voisins et la mairie de Santa Fe. Toutefois, la conception interne des deux versions de l'ISC-PIF était à leur charge et Chavalarias, qui a dessiné les plans de rue Nationale, montre d'avoir les idées claires en matière de fonctionnalité et de symbolique attribuées aux étages du bâtiment. Si les fondateurs du SFI avaient connu l'organisation du LANL, l'informaticien qui dirige l'ISC-PIF

> « ne li[t] pas de bouquins de gestion mais par contre [il] passe beaucoup de temps à comprendre tous les maillons du CNRS, leur règlementation, ce qu'on ne peut pas faire et [il] passe beaucoup de temps avec tout le personnel de l'administration pour [se] coordonner, pour mettre en place les choses, pour les former »[1973].

Le premier étage de l'UPS contient la salle des séminaires, qui est séparée d'une petite chambre rectangulaire utilisée pour les repas lors des journées d'études ou des conférences (fig. 15). Le deuxième étage contient l'*open space* dédié au *co-working*, ainsi que deux bureaux, un pour Chavalarias et un pour les assistants de gestion (fig. 16). Le troisième étage contient deux bureaux qui hébergent temporairement des équipes liées à l'ISC-PIF par des projets, puis une petite salle de réunion avec une bibliothèque et enfin une salle de récréation d'accès libre et auto-organisée avec une cuisine, un hamac, une petite table, des plantes et des jeux de rôle (fig. 17). Le rez-de-chaussée n'a pas été utilisable pendant les premières années, faute de fonds pour le rénover. Il se compose de plusieurs salles, dont seulement les parties en bleue de la fig. 18 n'appartiennent qu'à l'ISC-PIF : il s'agit d'un autre espace de *co-working* ; les parties en blanc sont partagées avec l'association culturelle Musaïques et la mairie de Paris. Si l'objectif de Chavalarias est de faire circuler les chercheurs et les chercheuses, le modèle reste celui de l'« incubateur » et du « tiers lieu » : « un tiers lieu c'est un lieu qui n'est pas ta maison, ce n'est pas ton lieu de travail quotidien aussi, c'est un lieu qui est entre ta maison où tu fais des rencontres [et un lieu] professionnel »[1974].
La métaphore que Chavalarias emploie pour décrire la circulation des associés et des usagers de l'institut relève du domaine de la physique : il explique avoir conçu la relation entre les différents étages de la structure à l'instar d'une « chambre à convection » : « la convection c'est surtout un côté 'marmite', tu vois, ça bout et puis tu montes »[1975]. Les activités en bas feraient des « moulins » qui montent étage par étage, jusqu'au dernier, celui de la « pépinière », où ça « se cristallise dans les bureaux un peu plus petits »[1976]. La métaphore de la convection se couple à celle de la

[1973] *Ibid.*
[1974] *Ibid.*
[1975] *Ibid.*
[1976] *Ibid.*

« distillation »[1977], car chaque étage que les personnes montent depuis le rez-de-chaussée jusqu'à la pépinière implique une augmentation de leur curiosité et de leur engagement dans des projets scientifiques de l'institut. Celui-ci, sous l'égide de l'InSHS du CNRS, attentif à la problématique de la participation, se propose d'héberger des expériences de science citoyenne et participative. La figure de l'incubateur ne vise pas seulement à attraire des chercheurs et des chercheuses, mais aussi des citoyens et des citoyennes, ainsi que des *startupers*. La manière de les attraire consiste dans le déploiement d'un certain nombre de dispositifs, par exemple celui des journées portes-ouvertes, où les scientifiques de l'institut exposent (et expliquent à qui leur demandent) des matériaux visuels issus de leurs recherches ou alors des supports vulgarisateurs ou artistiques. Dans le rez-de-chaussée, des *posters* qui résument les recherches des individus ou des groupes associés à l'ISC-PIF restent affichés sur les murs et peuvent susciter l'intérêt du public lors d'événements de différents types – par exemple il est possible de réserver l'espace des séminaires pendant une journée.

Où s'engendre donc l'interdisciplinarité ?

Si dans le cas du SFI les relations interdisciplinaires se tissent surtout lors des *workshops* dits intégratifs, dans le cas de l'institut francilien la phase de conception des collaborations scientifiques entre cultures différentes coïncide surtout avec l'écriture des projets pour des financements européens, nationaux, régionaux ou privés. Une fois obtenus les fonds, les chercheurs et chercheuses établis qui dirigent les projets embauchent des doctorants et des postdoctorants de deux ou plusieurs disciplines, et les mettent au travail en binôme ou par groupes. Le meilleur exemple est représenté par la collaboration entre les géographes modélisateurs de Géographie-Cité et les informaticiens de l'ISC-PIF, sous l'impulsion et la supervision de Denise Pumain et Arnaud Banos. Les modèles de la « famille SimPop » développés par l'école de Pumain ont été tous développés en embauchant des informaticiens et en les faisant collaborer avec des géographes, qui parfois sont capables de maîtriser seulement l'outil statistique, parfois de coder des versions simples de MBA (afin d'indiquer aux programmeurs la direction pour le modèle plus complexe), et qui dans quelques cas sont des informaticiens devenus géographes. Lors des débuts du RNSC en France et des financements européens aux SSC, les projets étaient conçus par Bourgine et ses alliés en dehors du cadre institutionnel du CREA ou de l'ISC-PIF, à savoir dans les situations sociales les plus diverses : dîners informels, conférences internationales (notamment la série des ECCS), réunions formelles ou informelles entre les différents entrepreneurs scientifiques, etc.

[1977] *Ibid.*

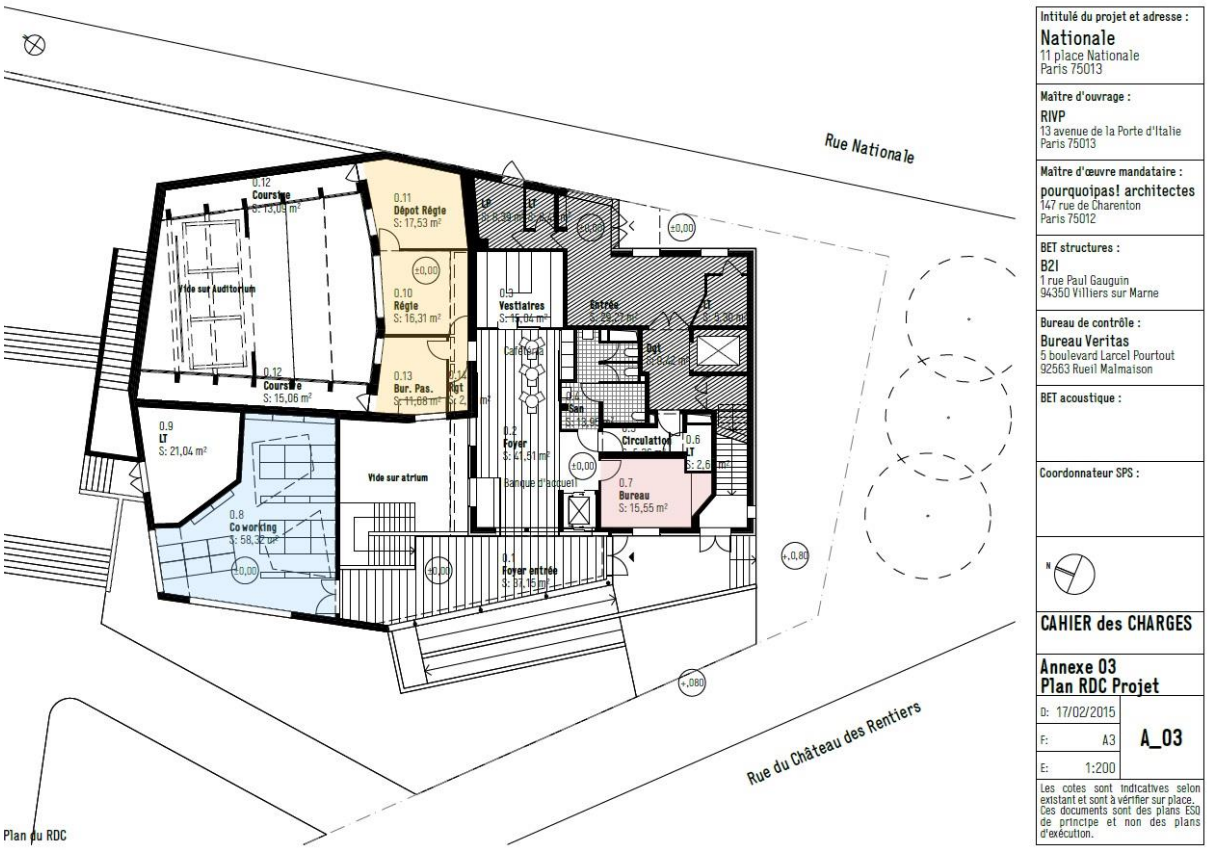


Figure 18. Rez-de-chaussée du siège de l'ISC-PIF au 113 rue Nationale

De manière donc analogue au SFI, les structures explicitement conçues afin d'encourager les collaborations interculturelles servent à *entretenir* des relations interdisciplinaires plutôt qu'à les générer *ex novo* et *in situ*. D'après Chavalarias, l'ISC-PIF est conçu pour être un incubateur de nouveaux projets : les occasions de rencontre demeurent toutefois encadrées dans des dispositifs précis, tels que les journées portes ouvertes ou les conférences, et l'architecture a peu ou prou d'influence sur le processus. Nous n'avons pas de données relatives à ces occasions, d'autant plus que lors de notre terrain le rez-de-chaussée de l'ISC-PIF n'était pas encore utilisé. Nous avons par contre des observations ethnographiques et des interviews quant au rôle de l'espace de *co-working* dans le maintien de ces échanges.

Lors de nombreuses visites à l'ISC-PIF, nous avons observé que, dans la salle de travail commune au deuxième étage, les présents interagissent entre eux à voix basse de temps en temps et quelques-uns travaillent avec un casque pour mieux se concentrer. Les interactions adviennent notamment lorsque les présents ont des questions à poser à leurs collègues ou lorsqu'ils souhaitent discuter d'une recherche menée en collaboration avec quelqu'un. Si la discussion doit être approfondie, les interlocuteurs peuvent migrer ailleurs, par exemple dans la salle de réunions-bibliothèque ou dans la salle récréation qui se trouvent au troisième étage, ou alors attendre la pause déjeuner ou la pause du goûter. Les bureaux de l'*open space* ne sont plus mobiles comme ils l'étaient rue Lhomond et surtout ils sont individuels : chacun a

son poste (notamment les résidents avec un poste fixe), les uns à côté des autres, plus comme dans un centre d'appels (sans les barrières entre les postes) que comme dans une classe de pédagogie inversée, où chaque étudiant aurait son bureau mobile et indépendant. Par rapport à la première période de l'ISC-PIF, les flux de personnes sont donc plus homogènes et réguliers : les associés s'y rendent régulièrement pour travailler à leurs recherches individuelles et collectives. Mais une ex-doctorante de l'institut, la physicienne Giulia Carra, confirme que les projets interdisciplinaires étaient conçus ailleurs, soit en amont des financements, soit en dehors de l'institut, dans des situations organisées *ad hoc* comme des excursions d'une semaine quelque part loin de Paris, où les participants peuvent justement concevoir de nouvelles collaborations[1978].

Conclusion

Ce chapitre a abordé la question de l'*ingénierie de l'interdisciplinarité*, à savoir l'ensemble des outils architecturaux, normatifs et organisationnels que les scientifiques utilisent dans le but explicite d'encourager le travail de collaboration entre disciplines différentes. D'une part, nous avons confirmé la thèse de Galison, selon laquelle l'architecture contribue à positionner les scientifiques dans l'espace social, en représentant un agent de changement en termes de comportements et à la fois une manifestation de la philosophie sous-jacente à ces comportements. D'autre part, nous avons montré que les édifices des deux instituts de la complexité ayant été expressément conçus pour favoriser les interactions interdisciplinaires, contribuent à les entretenir plus qu'à les générer *ex novo*. Bien que la réflexion sur le rôle de l'architecture dans la société ait été menée par plusieurs auteurs, la littérature qui porte sur l'interdisciplinarité en est plutôt dépourvue. Même si le questionnement de comment faciliter l'interdisciplinarité existe, il porte le plus souvent sur le rôle des métaphores, sur les manières de faciliter la création de langages pidgins ou bien sur la nature des outils méthodologiques à employer. Avec ce chapitre nous avons souhaité apporter des éléments de réflexion sur la question de l'usage de l'architecture dans le travail scientifique interdisciplinaire.

[1978] Entretien avec Giulia Carra, 07.07.18.

Acte 2 – L’ordinateur et le besoin d’une nouvelle épistémologie

Introduction à l'Acte 2

La conviction selon laquelle les sciences computationnelles nécessiteraient un tout autre outillage philosophique pour être correctement pensées est très répandue dans la littérature SHS sur la modélisation et la simulation numériques. De nombreux travaux soulignent la nouveauté absolue que l'ordinateur représente pour les sciences et pour les réflexions sur les sciences. Selon certains auteurs, des pans entiers de la spéculation philosophique devraient être écrits à nouveaux frais, si l'on veut saisir la spécificité du phénomène en étude. Les philosophes Roman Frigg et Julian Reiss ont repéré, dans la littérature sur le sujet, quatre axes principaux selon lesquels la simulation représenterait une nouveauté pour la réflexion : métaphysique (la simulation représente un monde parallèle) ; épistémique (la simulation a besoin d'une nouvelle épistémologie) ; sémantique (la simulation se réfère aux systèmes réels d'une manière nouvelle) ; et méthodologique (la simulation occupe une troisième place entre la théorie et l'expérience)[1979]. Par exemple, en ce qui concerne le premier de ces quatre points, les historiens Sam Schweber et Matthias Wächter affirment que la nature même des modèles numériques porte les scientifiques à confondre la réalité avec l'instrument pour l'étudier :

> « The interactive and visual character of the simulation gives the modelling an almost tactile quality and allows model and reality to become confounded in a way not experienced previously. This is surely a new perception of the notion of a scientific model »[1980].

L'épistémologue américain Paul Humphreys est l'un des soutiens les plus vigoureux de l'idée selon laquelle la « science computationnelle » nécessite une tout autre épistémologie : selon lui, grâce aux méthodes numériques, « plusieurs parties de la science sont […] entrées dans une phase clairement distincte de leur développement »[1981]. L'ordinateur et la simulation auraient, selon lui, introduit « des méthodes nouvelles, même révolutionnaires, dans la science »[1982]. Même si ces méthodes se composent de quelques traits familiers, elles déterminent l'impossibilité d'insérer la « science computationnelle » dans « la trichotomie traditionnelle en théorie, observation et expérience »[1983]. Pour Humphreys, penser que les méthodes

[1979] Frigg, R. & Reiss, J., « The philosophy of simulation », *op. cit.*
[1980] Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *op. cit.*
[1981] Humphreys, P., *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford, Oxford University Press, 2004, p. vii.
[1982] *Ibid.*, p. 57.
[1983] *Ibid.*, p. 51.

digitales ne représentent qu'une nouveauté simplement technique reviendrait à sous-estimer leur apport pour la science et la philosophie :

> « Why should philosophers of science be interested in these new tools ? Are they not simply a matter of applied science and engineering ? To view them in that way would be to seriously underestimate the changes which these methods have effected in contemporary theoretical science »[1984].

Pour la philosophe des sciences allemande Gabriele Gramelsberger, le tournant computationnel « a introduit des transformations épistémiques majeures dans la recherche. […] [Ceci en ouvrant] de nouvelles manières de performer les études sur le comportement des modèles »[1985]. Le philosophe des sciences Sergio Sismondo amorce sa contribution, dans le même livre introduit par Gramelsberger, de la manière suivante : « In this paper I provide an argument for and an explanation of a common claim that computer simulations can structure a substantially new style of scientific research »[1986]. La philosophe des sciences Stéphanie Ruphy pousse jusqu'au bout l'idée d'un nouveau *style de raisonnement*, en se référant à Ian Hacking pour l'analyser[1987]. Il est notoire que ce philosophe américain, en s'inspirant de l'historien Alistair Crombie, a identifié sept *styles de raisonnement*, introduisant chacun de nouveaux objets, des critères propres de validité et des techniques de stabilisation. À la question de savoir si les simulations numériques introduisent des nouveaux objets, des nouveaux critères de validité et de nouvelles techniques de stabilisation, Ruphy répond affirmativement aux trois points (bien qu'avec une certaine prudence). Selon elle, les sciences computationnelles introduisent, respectivement, 1) des histoires qui sont à la fois réalistes, parce qu'elles essaient d'insérer le plus grand nombre de détails à propos du système cible, et plausibles par rapport aux connaissances acquises sur le système cible, 2) des nouvelles fonctions épistémiques, notamment inférentielles et 3) des techniques de stabilisation des simulations, car ces dernières, tout en étant flexibles, peuvent intégrer des nouvelles fonctions ou de nouveaux paramètres sans perdre leur squelette numérique.

[1984] *Ibid.*, p. 50.

[1985] Gramelsberger, G., « From Science to Computational Sciences. A Science History and Philosophy Overview », dans Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011, p. 19.

[1986] Sismondo, S., « Simulation as a New Style of Research : Iteration, Integration, and Instability », dans Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011, p. 1151.

[1987] Ruphy, S., « Simulations numériques de phénomènes complexes : un nouveau style de raisonnement scientifique ? », dans Varenne, F., Silberstein, M., Dutreuil, S. & Huneman, P. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 2 : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2014, pp. 49-66.

Les quatre chapitres de cet Acte

Le premier chapitre de cet Acte 2 va montrer que les formes de l'administration de la preuve en vigueur dans le secteur des sciences computationnelles ne s'éloignent pas des disciplines classiques qui sont convoquées, notamment la biologie, l'informatique et les statistiques. Nous avons identifié quatre *régimes* principaux de l'administration de la preuve : *de l'étalon-or*, *statistique*, *de la parcimonie* et *du* backcasting ou *de la rétroduction*. Après un deuxième chapitre, l'Aparté 3, sur les différentes phases des pratiques de la modélisation numérique, où est mise en lumière l'importance de la collecte et de la construction des données, nous montrerons que les matériaux de la thèse relativisent la nécessité d'une nouvelle épistémologie pour penser les connaissances produites par le biais de l'ordinateur. Le troisième chapitre nous mènera plutôt à opérer un déplacement de regard vers les visions métaphysiques que nos interviewés ont vis-à-vis de la nature, de la société et des simulations numériques avec lesquelles ils travaillent. Dit autrement, pour enquêter sur les conditions de validité de la connaissance produite par les scientifiques de la complexité, au lieu d'interroger seulement les arguments et les pratiques de l'administration de la preuve, nous examinerons le statut accordé aux ontologies (et leurs effets sur la recherche). Il apparaît en effet plus utile de parler de positions *onto-épistémologiques* que d'une nouvelle épistémologie, si l'on veut comprendre comment les scientifiques computationnels justifient l'usage de leurs modèles numériques, entre eux et face à d'autres groupes sociaux. Le dernier chapitre de cet Acte 2 avance une critique des dangers métaphysiques et politiques liés à la vision digitale du monde, lorsqu'elle quitte le statut de métaphore heuristique – une métaphore parmi d'autres – pour devenir la seule métaphysique opérationnelle pour appréhender la réalité et vivre dans le monde.

Cet Acte débute par un glossaire commenté de la modélisation et de la simulation numérique. Il s'agit d'un langage riche et controversé. Terrain d'épistémologues et de scientifiques, il prend souvent une tournure normative qu'il convient de mettre en lumière, même brièvement.

L'approche STS

La géographe Nicole Mathieu et la philosophe Anne-Françoise Schmid soutiennent, dans un livre collectif sur l'interdisciplinarité et l'épistémologie, que cette dernière, « après avoir été éclipsée quelque temps par les *science studies*, est en train de renaître autour des concepts de modélisation et de simulation »[1988]. Sans rien enlever à l'enthousiasme de ces auteures pour le renouveau de l'épistémologie, dans cet Acte 2 nous montrons un certain nombre de limites intrinsèques aux approches épistémologiques sur la modélisation et la simulation numériques, le regard des STS

[1988] Mathieu, N. & Schmid, A.-F. (ed.), *Modélisation et interdisciplinarité*, *op. cit.*, p. 11.

nous dévoilant encore une fois des points que la philosophie des sciences laisse souvent dans l'ombre.

Souvent les propositions des philosophes des sciences ont une tonalité plus ou moins ouvertement normative, ou bien ressemblent à des reformulations philosophiques des discours scientifiques sans véritable recul par rapport aux pratiques observées. Pas question de faire ici de l'épistémologie normative, dont les risques sont résumés par Isabelle Stengers dans l'introduction au livre sur l'interdisciplinarité qu'elle a dirigé en 1987 : « le plus souvent, l'épistémologie normative, celle qui se propose d'édicter des 'critères de démarcation', de définir ce qui a droit au titre de science, est réduite à expliquer pourquoi les vainqueurs du jour avaient en droit raison »[1989]. Ce que nous proposons consiste à répondre à la question que Mary Morgan, parmi d'autres, a bien posé dans son livre *The World in the Model* : « How does working with [models] tell us anything about the world ? »[1990]. Mais on se propose de répondre avec des méthodes différentes, essentiellement sociologiques. Parce que cette question, au lieu de l'analyser de manière spéculative, nous l'avons posée à nos interviewés : ce sont eux qui ont fourni le matériau, à partir duquel on va proposer des régimes et des idéaux-types onto-épistémologiques. Dans son livre, Morgan, spécialiste des sciences économiques, vise à expliquer pourquoi les modèles peuvent être critiqués ou considérés comme valables. À partir de quelques cas concrets, la philosophe invite à réfléchir sur la construction, l'usage et la validité des modèles en se donnant un plan universel et descriptivo-normatif. Elle s'intéresse souvent à la sphère psycho-cognitive et tâche de décrire le fonctionnement interne aux modèles, aussi bien que les règles de raisonnement qui les font voir comme un certain type d'« expériences » se rajoutant à celles menées dans le laboratoire[1991]. Surtout, Morgan finit par défendre une position épistémologique qui reformule les discours de certains économistes, ce qui ne permet pas d'avoir un recul sur les pratiques ni de les traiter symétriquement dans leur pluralité. À la question, « How do models provide such a method of enquiry that enables this double life[1992] to go on ? », elle répond qu'il s'agit d'une forme d'expérience de plus : « My answer is that model reasoning, as a generic activity in economics, typically involves a *kind of experiment* »[1993]. La philosophe finit ainsi par légitimer l'usage des modèles en économie, en se faisant porte-parole du *travail de démarcation* des économistes, voire de certains économistes parmi d'autres[1994]. Certes,

[1989] Stengers, I. (ed.), *D'une science à l'autre*, *op. cit.*, p. 11.
[1990] Morgan, M.S., *The world in the model*, *op. cit.*
[1991] *Ibid.*, p. 257.
[1992] Double vie parce que les modèles sont, pour Morgan, à la fois des mondes *dans* lesquels enquêter et des mondes *à travers* lesquels enquêter sur le monde réel.
[1993] Morgan, M.S., *The world in the model*, *op. cit.*, p. 31.
[1994] « I suggest that we can characterize model reasoning as a kind of experiment in the following way. Models are made to address some particular purpose, and so working with a model typically begins with the economist asking a question related to that purpose. To answer the question, the economist makes an assumption that fixes something in the models, or changes something in the model, that is, in the diagrams or equations, or other

elle accomplit ainsi un travail descriptif éclairant et heuristique. Mais il s'agit d'une description universalisante, qui ne propose pas de décalage par rapport à l'auto-description de ceux qu'elle décrit. Morgan invisibilise ainsi certaines auto-descriptions au profit d'autres, glissant dans une normativité qui ne dit pas son nom. Qui plus est, une telle description évacue le niveau ontologique ainsi que les niveaux matériel, pratique et politico-idéologique, en tombant parfois dans l'hagiographie positiviste ou dans la remarque légitimatrice qui *prend partie au* débat, au lieu de *rendre compte du* débat et de ses raisons profondes. Enfin, la position de Morgan trouve une collocation dans la classification idéal-typique du chapitre 13, comme d'autres philosophes qu'on classera dans les différentes *onto-épistémologies* à côtés des scientifiques. Cela n'est pas un problème en soi, puisque dans le chapitre 14 nous expliciterons notre propre métaphysique. Toutefois il est convenable de séparer autant que possible le moment analytique du moment normatif, ou les « tâches techniquement premières » (décrire, comprendre) des « tâches techniquement secondes » (prévoir, expliquer, critiquer)[1995] ; souvent les philosophes des sciences computationnelles ne semblent pas faire la distinction entre les deux.

Il ne s'agit pourtant pas de refuser la philosophie engagée ou la philosophie tout court, car notre raisonnement n'implique pas que tout philosophe travaillant *avec* et *pour* les scientifiques échoue à mettre à distance son objet d'étude[1996]. L'approche suivie dans cet Acte 2 s'inscrit dans le sillage de l'article *Modèles et modélisations* des historiens Michel Armatte et Amy Dahan[1997]. En faisant une histoire de l'usage et de la conception des modèles, dans des disciplines qui vont de la physique aux sciences du climat en passant par l'économie, les auteurs relèvent que « les discours sur les modèles qui prennent leur racine dans les travaux logicistes des années 1920 et forment le socle épistémologique jusqu'aux années 1950 à 1970 sont en décalage avec les pratiques constatées dans la même période »[1998]. Ce travail montre comment l'idée d'un modèle général des modèles, ou d'un cadre unificateur pour les penser et les analyser, est une chimère face au hiatus « entre discours épistémologique normatif sur les modèles et riche variabilité des pratiques »[1999]. Le manifeste programmatique de

---

material, that the model is made in. He or she then investigates the effect of that assumption, or change in the model, by manipulating the resources of the model in a model experiment to demonstrate an answer » : *ibid.*

[1995] Lemieux, C., 2011, « Jugements en action, actions en jugement. Ce que la sociologie des épreuves peut apporter à l'étude de la cognition », dans Clément, F. & Kaufmann, L., (ed.), *La sociologie cognitive*, Paris, Éditions de la MSH, pp. 249-274.

[1996] Pour des classifications philosophiques non-normatives, voir par exemple : Sismondo, S., « Models, Simulations, and Their Objects », *op. cit.* ; Hacking, I., *Representing and intervening*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983 ; Galison, P., *Image and Logic*, *op. cit.* ; Latour, B., *Enquête sur les modes d'existence. Une anthropologie des Modernes*, Paris, La Découverte, 2012 ; Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 9-47.

[1997] Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A., « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'histoire des sciences*, 2004, vol. 57, n. 2, pp. 243-303.

[1998] *Ibid.*, p. 244.

[1999] *Ibid.*, p. 287.

l'article d'Armatte et Dahan est un plaidoyer pour enrichir l'étude cognitif des modèles avec l'étude des pratiques sociales, matérielles, techniques et politiques, afin de mieux restituer les épistémologies dans leur existence concrète, hétérogène, bricolée et hybride.

Si la méthode employée ici pour répondre à des questions épistémologiques est sociologique, nous n'appliquerons pas pourtant le fameux *cycle de la crédibilité* décrit par Latour et Woolgar dans un des livres fondateurs des STS[2000] ; ni l'idée de la *circulation de la référence*, issue d'un autre livre de Latour[2001]. Nous ne suivrons pas non plus les autres approches classiques des STS, comme celles mentionnées dans l'article classique de Steven Shapin, *Cordelia's Love*[2002]. Même si tout cela reste dans l'arrière-plan théorique de cet Acte 2, en termes de concepts opérationnels on emploiera surtout la sociologie argumentative de Francis Chateauraynaud. Dans l'Aparté 3, on fera référence au travail d'Emmanuel Didier sur la fabrication des statistiques américaines, tandis que dans le troisième chapitre on se référera à deux des quatre *causes* identifiées par Aristote (à savoir la *matérielle* et la *formelle*). Le terme de *culture épistémique* de Knorr-Cetina sera particulièrement utile pour coupler les *positions onto-épistémologiques* des spécialistes des systèmes complexes à des aires disciplinaires. En outre, dans cet usage explicatif des cultures scientifiques par rapport aux visions métaphysiques des chercheurs et des chercheuses, nous avons été inspiré par l'article que l'historien Christophe Bonneuil a dédié à l'engagement public des scientifiques français sur les enjeux du génie génétique[2003]. Bonneuil y a montré que les biologistes et les agronomes avaient tendance à prendre position dans le débat en fonction précisément de leur *culture épistémique* d'appartenance. Si l'historien visait à complexifier les représentations « trop unifiée[s] et indiscriminée[s] de l'espace public »[2004], de même nous souhaitons apporter une complexification de ce que souvent, dans la littérature, est traitée simplement de « simulation numérique ».

[2000] Latour, B., *La vie de laboratoire. La production des faits scientifiques*, Paris, La Découverte, 1996.
[2001] Latour, B., *Petites leçons de sociologie des sciences*, *op. cit.*
[2002] Shapin, S., « Cordelia's Love : Credibility and the Social Studies of Science », *Perspectives on Science*, n. 3, pp. 255-275.
[2003] Bonneuil, C., « Cultures épistémiques et engagement public des chercheurs dans la controverse OGM », *Nature Sciences Sociétés*, 2006, vol. 14, n. 3, pp. 257-268.
[2004] *Ibid.*, p. 258.

Glossaire de la modélisation et de la simulation numériques

Les termes de « modèle » et de « simulation » sont hautement polysémiques et varient énormément selon les domaines étudiés. Ce glossaire entend définir un certain nombre de termes, sans en cacher le pluralisme et la complexité sémantiques, pour préparer la lecture des chapitres suivants. On pourrait se demander pourquoi insérer un glossaire ici, s'il y en a un à la fin de la thèse. Parce que nous croyons que la terminologie de la modélisation et de la simulation numériques mérite un bref commentaire et une mise en articulation.

Polysémie du mot « modèle »

Par modèle on peut entendre à la fois la synthèse du fonctionnement d'un objet réel que l'on tente de saisir (comprendre et expliquer) et la référence à suivre pour construire un objet qui n'existe pas encore[2005]. Si le deuxième type de modèle caractérise l'architecture et l'ingénierie, le premier concerne les sciences explicatives, naturelles et sociales. Les chercheurs et les chercheuses, toutes disciplines confondues, s'accordent sur le fait que le modèle doit réduire la complexité du système représenté, pour en capter l'essentiel. Scientifiques et humanistes s'entendent pour dire qu'il y a un réductionnisme inéliminable dans tout modèle, car une carte qui serait aussi précise que le territoire n'apprendrait rien sur celui-ci. Les débats, toutefois, abondent quant à la manière d'entendre ce qu'est un réductionnisme acceptable : certains chercheront à concevoir des modèles très simples, tandis que d'autres viseront à les complexifier asymptotiquement.

Tension entre KISS & KIDS

Les opinions varient quant à la nécessité de complexifier les modèles. Ce type de débat est interne à toute discipline ou à tout domaine interdisciplinaire, y compris les SSC. Par exemple, le politiste et modélisateur Robert Axelrod, longtemps associé au SFI, soutient que l'approche à suivre est le KISS : « Keep It Simple, Stupid ! »[2006]. Le mathématicien et philosophe Bruce Edmonds et l'économiste Scott Moss invitent, pour leur part, à adhérer à l'approche KIDS : « Keep It Descriptive, Stupid ! »[2007]. En revanche, pour le géographe et modélisateur Arnaud Banos, le choix de ces deux approches dépend de l'objectif que le modélisateur attribue, au cas par cas, à la simulation. Banos a proposé ainsi un tableau où, sur l'axe horizontal, on va de KISS à KIDS et, sur l'axe vertical, on va de Stylisé – soit un modèle pour un phénomène

[2005] Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A., « Modèles et modélisations, 1950-2000 », *op. cit.*

[2006] Axelrod, R., *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, Princeton University Press, 1997.

[2007] Edmonds, E. & Moss, S., « From KISS to KIDS. An 'Anti-simplistic' Modelling Approach », dans Davidsson, P., Logan, B. & Takadama, K. (ed.), *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, Springer, 2005, pp. 130-144.

général – à Particulier – un modèle visant un phénomène spécifique[2008]. Cela correspond au fond à la distinction que d'autres scientifiques font entre le « *toy model* » et le « modèle réaliste » ou entre « modèles phénoménologiques » et « modèles profonds » :

> « We are getting a better picture of what social, economic, and psychological behavior is ; we are establishing correlations between different phenomena and building what are called 'phenomenological models' rather than 'deep models'. A phenomenological model accounts for and correlates the data in a quantitative, descriptive way without going into the deeper reason why such correlations exist. Such models are the first step toward a deeper understanding »[2009].

Les premiers seraient des modèles quantitatifs et descriptifs, tandis que les seconds exploreraient les raisons causales à la base des phénomènes, et pour cette raison les modèles phénoménologiques seraient propédeutiques vis-à-vis des modèles profonds. Pour d'autres, cette distinction renvoie à une tension entre le modèle le plus simple et le modèle le plus complexe. L'idéal pour certains – souvent des humanistes ou des biologistes – est de complexifier le plus possible, tout en respectant le principe de la parcimonie ou du rasoir d'Occam :

> « Donc le *toy model* c'est celui-là, c'est le premier, c'est celui où tu rajoutes le minimum de choses, et tu regardes : est-ce qu'on arrive à dépasser un certain objectif avec ce modèle-là ? Et l'idée étant après [qu']en rajoutant […] un mécanisme, tu essaies d'obtenir, d'atteindre ce même objectif. Est-ce que tu n'as pas perdu en efficacité en rajoutant un mécanisme, que tu arrives toujours à atteindre ton objectif que tu t'étais fixé avec le *toy model* ? […] si tu arrives à atteindre cet objectif, tu te mets un objectif un peu plus poussé, un peu plus fin. Et est-ce que tu arrives à l'obtenir, etc. ? L'idée c'est d'itérer vraiment comme ça »[2010].

D'autres – souvent des physiciens ou des économistes – visent le *toy model* comme idéal, car il aurait la même pureté et simplicité, la même élégance et solidité épistémologique que les modèles de physique – statistique, ou autre. Un modèle trop complexe, pour ces scientifiques, apparaît comme une « usine à gaz » qui risque de ne pas saisir l'essentiel du système et d'inhiber les tests. Illustre ce point un extrait, à propos de l'utilité en économie des *toy models* réalisés par MBA, issu d'un entretien avec l'économiste associé au SFI Blake LeBaron :

[2008] Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre*, *op. cit.*, p. 93.
[2009] Pagels, H.R., *The Dreams of Reason*, *op. cit.*, p. 90.
[2010] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

> « One of the reasons why ABM got troubles in economics is that when you turn it on a computer, simulation is the attempt to get really close to reality. Lots of people try to build realistic models. In Washington there's people doing very detailed models on tax system. In these complex models you're never gonna understand what's the key detail. On the other side you got these computer experiments, much simpler, toy models, not intending to be all the reality, they try to understand the basic components. The problem with economists is they believe that models should fit very well with reality to be good. And I don't think that's right. ABMs should be treated as other pencil and paper economics models, which are sort of thought experiments »[2011].

La tension entre complexification et simplification est illustrée à la fin de cet extrait qui reporte la liste de points que l'informaticienne du SFI Melanie Mitchell attribue au processus de modélisation numérique :

> « Simplify the problem as much as possible while keeping what is essential. Write program which simulates many components following simple rules with specified interactions and randomizing elements. Run program many times with different random number seeds, collecting data and statistics from the different runs. Attempt to understand how the simple rules gave rise to the observed behavior. Perform parameter changes and 'lesions' on the program to locate the sources of behavior and the effects of different parameters. Simplify the simulation even further if possible, or add additional elements that were found to be necessary »[2012].

Pour Mitchell, les *toy models* constituent des « modèles exploratoires », tandis que les modèles réalistes sont des « modèles prédictifs »[2013]. Cela recoupe une autre distinction, celle entre « modèles descriptifs », typiquement les modèles statistiques, et « modèles génératifs », qui visent à expliquer grâce à l'activité même de construction du modèle, qui grandit sur lui-même à partir des règles codées[2014]. En outre, les *toy models* peuvent être des *proofs of concept* : selon la physicienne de l'Institute for Scientific Interchange de Turin Laetitia Gauvin, le choix du terme dépend de l'interlocuteur avec qui le scientifique a à faire au cas par cas[2015].
L'informaticien de l'ISC-PIF Romain Reuillon rappelle qu'à chaque phase d'élaboration d'un modèle suit une simplification, puis une complexification ultérieure dont il faut tester l'harmonie avec le reste des paramètres considérés, puis encore une

[2011] Entretien avec Blake LeBaron, 14.09.16.
[2012] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 3.
[2013] *Ibid.*, p. 4.
[2014] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[2015] Entretien avec Laetitia Gauvin, 15.02.17.

simplification : « C'est comme un truc qui respire »[2016]. Pour Banos il faut un écosystème de petits modèles simples, à complexifier graduellement, mais qui sont toujours temporaires et donc à abandonner :

> « dès le départ, il ne fa[ut] pas tout miser sur le gros modèle final, on doit construire plein de petits modèles intermédiaires progressivement complexifiés. Cela permet de comprendre des mécanismes, donc ces modèles-là, ce sont un peu des modèles jetables. Donc il faut fluidifier la fabrication des modèles. Ensuite, chacun de ces modèles-là doit être complètement analysé en permanence »[2017].

On peut mentionner, sans les développer, deux autres débats qui traversent cette tension : celui entre les modèles *data driven* et les modèles *hypothesis driven*[2018], et celui parallèle entre ceux qui pensent pouvoir se passer des théories en utilisant la corrélation statistique aux *Big Data* (position connue sous le titre de « The End of Theory »[2019]) et ceux qui pensent que les données nécessitent toujours d'une théorisation qui en rendent compte ou qui soit même préalable (car souvent les scientifiques font des hypothèses explicatives et puis ils cherchent les données pour les justifier). Les représentants des SSC, souvent considérés ou se présentant comme des experts de l'analyse de *Big Data* (aujourd'hui par ailleurs stratégique dans la collecte des fonds), se catégorisent – au moins dans notre corpus – toujours dans la seconde catégorie.

Définitions de simulation

Certains historiens et sociologues des sciences ont renommé la simulation numérique avec des termes propres : Peter Galison l'a appelée *trading zone*, tandis qu'Anne Marcovich et Therry Shinn l'ont appelée « combinatoire »[2020].

Nous suivons, ici, plutôt le philosophe des sciences Franck Varenne qui définit la simulation au sens large de la manière suivante : « dans l'acte d'utiliser un modèle ou une simulation scientifique, il s'agit toujours de manipuler, de modifier ou de construire un objet, vivant ou non, matériel ou formel, en vue de répondre à un certain nombre de questions relevant d'une enquête de connaissance »[2021]. La simulation numérique est une sous-typologie de cette définition ; Varenne la définit comme « un type de *stratégie de transformation et de traitement de symboles* »[2022]. Selon lui,

---

[2016] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[2017] Entretien avec Arnaud Banos, 01.03.17.
[2018] Par exemple, Dubois, D., Hájek, P. & Prade, H., « Knowledge-driven versus data-driven logics », *Journal of Logic, Language and Information*, 2000, vol. 9, n. 1, pp. 65-89.
[2019] Anderson, C., « The End of Theory : The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete », *Wired*, 06.23.08 : https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/.
[2020] Marcovich, A. & Shinn, T., « Where is disciplinarity going ? », *op. cit.*
[2021] Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique », *op. cit.*, p. 9.
[2022] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie*, Paris, Éditions Matériologiques, 2017, p. 130.

> « le computeur permet également que naisse et se développe ce que nous proposons de décrire comme une pratique nouvelle de formalisation : une pratique d'*analyse par synthèse* assistée par computeur. Nous voulons désigner par-là ces recours à la programmation informatique qui, grâce à la souplesse et à l'*expressivité* croissantes des langages de programmation, autorisent directement à *modéliser des idées* plutôt qu'à *analyser des nombres* »[2023].

Sans entrer dans les détails définitionnels qui sont les siens, cet épistémologue porte l'attention sur les simulations qui ne font qu'exécuter des modèles mathématiques formels et sur celles qui agencent des symboles en référence à des systèmes réels dont on essaie d'imiter le fonctionnement :

> « s'il se trouve que les séquences de l'exécution du programme *émulent* parfaitement la séquence des étapes d'un calcul formel explicite par ailleurs, ou au moins pratiquement explicitable, on peut dire que l'ordinateur procède littéralement à un calcul formel et non à une simulation. Il est, dans ce cas, une machine logique et non prioritairement une machine à simulation »[2024].

Dans le premier cas le modèle est appelé « modèle numérique » et concerne typiquement les équations de physique qui sont exécutées sur un ordinateur ; les modèles des sciences de la complexité relèvent plutôt de la catégorie que Varenne nomme, à la suite de nombreux scientifiques et philosophes, « modèle de simulation » : il s'agit d'un modèle qui, souvent à travers un langage orienté-objets et par un ensemble de symboles qui font référence à des entités externes, est censé imiter, voire émuler un système réel[2025].

Le simulat

Pour distinguer le processus de la simulation numérique de son résultat, Varenne propose d'appeler ce dernier *simulat*. Le *simulat* « désigne le résultat d'une simulation comme le filtrat désigne le résultat d'une filtration »[2026]. Il n'est pas un symbole unique et simple, mais un « agrégat de symboles »[2027]. Ensuite, le philosophe suggère de distinguer entre 1) le temps du système réel, 2) le temps de calcul de la simulation (calcul pas à pas) pour arriver au simulat et 3) le temps du simulat, un temps crée par l'ordinateur quand il reproduit le simulat (temps qui peut être étendu ou raccourci selon les nécessités du modélisateur).

[2023] *Ibid.*, p. 378.
[2024] Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique », *op. cit.*, p. 32.
[2025] *Ibid.*, p. 40.
[2026] Varenne, F., « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », dans Parrocchia, D. et Tirloni, V., *Formes, systèmes et milieux techniques*, Lyon, Jacques André, 2012, p. 2.
[2027] *Ibid.*

Différences entre modélisation et simulation

Dans près des deux tiers de nos entretiens auprès des représentants des SSC, nous avons posé la question suivante : quelle est selon vous la différence entre la modélisation et la simulation ? Prenons les études STS sur les sciences du climat comme pierre de touche. Par exemple, l'historienne Hélène Guillemot[2028] donne les définitions suivantes pour la communauté des modélisateurs du climat : un modèle indique pour eux un programme implémenté sur un ordinateur qui, par algorithmes, procède pas à pas ; une simulation serait le résultat du modèle, par exemple une certaine configuration climatique à partir des données en entrée ; une expérience numérique[2029] est, enfin, une simulation qui vise à explorer le comportement du climat en faisant varier des paramètres.

Or, bien qu'il y ait des résonances avec la terminologie de nos interviewés, dans les SSC la modélisation est en général le processus de construction théorique, verbale ou mathématique, d'une théorie locale sur le fonctionnement d'un système ; tandis que la simulation est en général le processus de déploiement computationnel du modèle dans un support informatique. Le modèle indique un ensemble d'hypothèses et de formules mathématiques écrites sur papier. La simulation est une « expérience numérique » faite dans un logiciel où le modèle a été introduit et traduit. Pour les scientifiques de la complexité, elle englobe à la fois la phase de codage informatique, l'idée de l'expérience numérique et son résultat.

Selon les mots de l'un de nos interviewés, un biologiste, le modèle représente « une description tout en un, de la totalité de ce qui se passe [dans le système réel], alors que la simulation est plus une succession d'événements ou un algorithme réitéré »[2030]. Ainsi, la simulation se rapproche d'une expérience pour son côté imprédictible :

> « J'ai l'idée que dans la modélisation il y a un côté semblable à une fonction : elle est définie sur ses bornes, t'as pas besoin de connaître le point A pour connaître le point B. Alors que dans la simulation j'ai l'impression que c'est quelque chose de plus itératif. Pour connaître la suite des événements tu dois connaître l'étape d'avant. […] Ce qui fait que dans le cadre de [notre projet] moi je verrais le modèle comme un ensemble de règles qui vont décrire un comportement, par exemple l'évolution du nombre des cellules au cours du temps […] Tu as juste à prendre ton équation et à remplacer la variable T par 100, et ça marche. Alors que dans une simulation, […] tu es obligé de tout faire pas à pas, dans l'ordre, pour avoir la

[2028] Guillemot H., « Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and 'bottom-up epistemology' lessons », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2010, n. 41, p. 242.
[2029] Désormais l'on parle d'expériences *in vivo*, *in vitro* et *in silico*.
[2030] Entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.

succession des événements. Et donc une simulation se rapprocherait un peu plus de ce qu'on a dans le monde vivant qu'un modèle »[2031].

Selon la plupart des scientifiques computationnels, ainsi que la plupart des philosophes de la simulation numérique, cette dernière partage avec les expériences classiques la possibilité de faire varier plusieurs paramètres pour tester différentes hypothèses théoriques. Autrement dit, la simulation est vue comme un modèle en mouvement (Varenne décrit la simulation comme une manière de « plonger le modèle dans le temps »[2032]).

Friction de données et friction computationnelle

Un mot mérite d'être dit sur quelques concepts proposés par l'historien des sciences Paul Edwards et qu'on emploiera par la suite. Dans l'introduction de son livre, *A vast machine*[2033], qui retrace l'histoire de l'infrastructure globale dédiée à l'étude du climat, il explique qu'il existe deux manières d'étudier ce dernier : soit en recueillant les données du temps et du climat de la planète entière en regardant au passé, soit en essayant de comprendre le climat comme un système physique pour le prévoir. Selon son langage, la première manière vise à *créer des données mondiales* (*making global data*), à savoir à mettre en place le réseau infrastructurel international standardisé pour la collecte des données sur le climat sous plusieurs formes (satellites, centres de calcul, etc.), mais rencontre l'écueil de la *friction des données* (*data friction*) : l'inertie institutionnelle, les contraintes financières et le problème de l'intégration de données hétérogènes en représentent quelques exemples[2034]. *Créer des données mondiales* se couple au souci de *rendre les données globales* (*making data global*) : unifier et rendre commensurables des données hétérogènes, imparfaites, incomplètes[2035].

La deuxième manière utilise plusieurs typologies de modèles, dont les « modèles de simulation »[2036], qui rencontrent l'écueil de la *friction computationnelle* (*computational friction*). Si la *friction des données* indique la difficulté, le coût et la lenteur qu'implique l'effort de collecter un grand nombre de traces pour un calcul global[2037], la *friction computationnelle* indique le même genre d'obstacles, mais tels qu'ils sont rencontrés sur le chemin du calcul[2038]. Dans les deux cas, pour Edwards la

---

[2031] *Ibid.*

[2032] Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique », *op. cit.*, p. 28.

[2033] Edwards, P., *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Cambridge, MIT Press, 2010, pp. XIV-XV.

[2034] *Ibid.*, p. 251.

[2035] *Ibid.*, p. 272.

[2036] Edwards explique qu'il s'agit de modèles numériques qui essayent de prévoir le comportement général de la Terre sur des longues périodes. Ils se distinguent 1) des modèles de réanalyse, eux aussi des modèles numériques, qui prévoient toutefois le climat à court terme à partir de données météorologiques réelles, et 2) des modèles d'analyse des données, qui sont un ensemble de techniques mathématiques et d'algorithmes, qui servent à traiter les traces historiques du temps et du climat.

[2037] *Ibid.*, p. 80.

[2038] *Ibid.*, p. 83.

friction représente une métaphore physique pour connoter tout phénomène de résistance à la collecte de données et à leur traitement. Extraire les données, les transférer, les contrôler, les stocker, coûte en effet du temps, des énergies, des ressources mentales et matérielles. Les limites physiques et économiques pour la mémoire et la rapidité nécessaires au calcul des données, ainsi que les ressources humaines qui servent à programmer ou à réparer les dispositifs techniques et à interpréter les données, produisent une friction qui peut empêcher aux données de devenir information et connaissance[2039].

Une culture épistémique computationnelle

Si une caractéristique générale existe dans notre corpus d'interviewés, c'est le fait que nos interlocuteurs traitent leurs modèles comme leur objet d'étude. La philosophe des sciences, Mary Morgan, affirme quelque chose à propos des modèles économiques qui s'applique aussi et davantage aux modèles des représentants des SSC : « [they] use models to investigate two different domains : to enquire into the world of the model and to enquire into the world that the model represents »[2040] ou dit autrement : « I argue, *models function both as objects to enquire into and as objects to enquire with* »[2041]. Il est courant de penser que l'observation précède le modèle. En réalité souvent les modèles servent à déduire l'inobservable ou l'inobservé du système réel, à partir du peu qui est connu à son égard ainsi que d'un ensemble d'hypothèses sur son fonctionnement. Quelques fois les modèles numériques servent à préparer des expériences réelles, mais dans tous les cas ils représentent à la fois l'objet à étudier et l'objet avec lequel l'étudier. Dans l'absence d'expérience réelle, le modèle se nourrit de données et d'hypothèses, voire seulement d'hypothèses verbales. Si on adopte une échelle vaste et décide de parler en général des sciences numériques, la *culture épistémique computationnelle* se caractérise par le fait que ses objets d'étude se dotent d'une vie propre, qui coïncide avec les modèles eux-mêmes. L'objet n'est plus invisible comme les quarks de la physique des hautes énergies ou visible et manipulable comme une culture de cellules ; il n'est plus « *out there* ». L'objet d'étude n'est pas non plus extérieur à la paillasse : *ce qui est étudié finit par être l'instrument qui est censé permettre de comprendre le système réel*.

[2039] *Ibid.*, pp. 83-84.
[2040] Morgan, M.S., *The world in the model*, *op. cit.*, p. 30.
[2041] *Ibid.*, p. 31.

Quels régimes de l'administration de la preuve pour les SSC ?

Introduction

L'Acte 2 dans son ensemble aborde la question de l'épistémologie des sciences computationnelles. À partir des pratiques des scientifiques s'inscrivant dans le domaine des systèmes complexes, faut-il une autre épistémologie pour penser les savoirs numériques ? Partons de la manière dont les chercheurs et chercheuses du domaine conduisent l'administration de la preuve. La question spécifique qui guide ce chapitre se résume alors ainsi : quels sont les arguments – verbaux, graphiques, pratiques – sur lesquels les scientifiques de la complexité s'appuient pour défendre la crédibilité de leurs simulations numériques[2042] ? S'agit-il réellement d'une nouveauté absolue dans le panorama de l'étude des savoirs, comme certains auteurs le soutiennent, ou suffit-il de remonter aux *cultures épistémiques* des membres de la *plateforme méta-disciplinaire* des SSC ? Notre terrain montre que les stratégies argumentatives des scientifiques de la complexité ne se différencient pas de celles déjà existantes dans les disciplines de la biologie, des statistiques et de l'informatique.

La simulation comme laboratoire digital

Plusieurs auteurs – dans les sciences de la nature et les SHS – ont écrit que la simulation numérique représente une troisième manière de faire science, au-delà de, ou à mi-chemin entre la théorie et l'expérience. Par exemple, les fondateurs du SFI, de manière cohérente avec l'esprit développé au Los Alamos National Laboratory, l'ont décrite comme de l'« expérimentation théorique »[2043]. Dans un projet de recherche destiné à la DARPA, le SFI écrit : « Simulation [plays more the role of] an intermediate between empirical observation and theory than as an end in itself »[2044]. Selon l'informaticienne Melanie Mitchell il y a quatre manières de faire science, la simulation constituant une sorte de laboratoire digital :

> « Mitchell […] explained that there are four approaches to science – theory, laboratory experiments, Gedanken experiments (thought experiments), and

[2042] Nous alternons le terme de « simulation numérique » ou simplement de « simulation » avec celui de « simulation par ordinateur » (moins fréquente), qui selon certains auteurs est une expression plus précise, pour distinguer les simulations numériques à proprement parler (par exemple, l'exécution d'une équation) des logiciels de simulation mimétique des systèmes réels à travers « agents » au sens le plus large du terme (automates cellulaires, verres de spin, MBA, réseaux, etc.). Dans la suite de ce travail, toute occurrence de « simulation numérique » se référera à des calculs computationnels qui vont bien au-delà de la simple computation d'une équation.

[2043] SFI, « The Aims of the Rio Grande Institute. September 20, 1984 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».

[2044] SFI, « Foundations of Complex Systems. The Santa Fe Institute DARPA Program. Draft White Paper », boîte d'archives « RE Science BD 96 (DARPA) ».

computer experiments. Computer experiments, she contends, allow the scientist to incorporate theory and thought in a sort of digital laboratory »[2045].

Pour John Holland, le modélisateur numérique est d'abord un théoricien qui teste, avec l'ordinateur, des déductions et des inductions, ce qui réincarne selon lui le cycle liant théorie et expérience et qui permet de travailler sur une « théorie en déploiement »[2046]. Pour le physicien et épidémiologiste computationnel Alessandro Vespignani, basé à la Northeastern University de Boston, la simulation est sans doute une expérience, surtout lorsqu'elle est « *data-driven* »[2047] : si le modèle ne se base que sur les hypothèses du scientifique, dans une simulation nourrie de données, dit-il, on peut expérimenter en changeant des paramètres et trouver de nouvelles hypothèses. L'ordinateur devient ainsi pour lui un « laboratoire synthétique », pouvant produire des scénarios utiles aux décideurs politiques. Selon les 70 auteurs de la feuille de route du RNSC français, l'ordinateur est devenu une composante nécessaire pour l'épistémologie scientifique en tant qu'extension de l'expérimentateur humain[2048].
À de rares exceptions, comme celle du philosophe Claus Beisbart[2049] – qui définit les simulations comme des « arguments » et non pas comme des « expériences »[2050]–, la position des auteurs cités ci-dessus relevant de la catégorie des modélisateurs trouve un écho important du côté des philosophes des sciences. En 1986, Marie Farge proposait de voir la simulation numérique comme une troisième voie entre théorie et expérience, notamment comme une manière de renouveler les « expériences de pensée » au sens de Galilée[2051]. Dans son livre *Image and Logic*, Peter Galison mentionne le fait que la simulation pose des problèmes métaphysiques et soutient qu'elle problématise à nouveaux frais les notions de théorie, d'instrument et d'expérience[2052]. De manière similaire, Deborah Dowling parle des simulations comme de manières pour « expérimenter sur les théories »[2053]. Eric Winsberg a soutenu l'idée que les simulations partagent des caractéristiques à la fois des théories et des expériences, car il s'agit de computations numériques interprétables à partir de théories, mais qui expérimentent sur des données, lesquelles doivent être collectées,

[2045] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1, p. 4.
[2046] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Vol. 2, Number 1, p. 10.
[2047] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2048] Bourgine, P., Chavalarias, D. & Perrier, E., *French Roadmap for Complex Systems. 2008-2009 Edition*, ISC-PIF, RNSC, IXXI, 2009, p. 14. En ligne sur HAL : https://hal-polytechnique.archives-ouvertes.fr/hal-00392486.
[2049] Beisbart, C., « How can computer simulations produce new knowledge ? », *European Journal Philosophy of Science*, 2012, p. 2, pp. 395-434.
[2050] Pour d'autres références d'auteurs qui ne voient dans l'ordinateur que simplement un autre outils théorique, conceptuel ou statistique, voir celles contenues dans Varenne, F., « What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France) », dans Giambasi, N. & Frydman, C., *Simulation in Industry. Proceedings of the 13th European Simulation Symposium*, Ghent, SCS Europe Bvba, 2001, pp. 549-554.
[2051] Farge, M., « L'approche numérique en physique », *Fundamenta Scientiae*, 1986, vol. 7, n. 2, pp. 155-175.
[2052] Galison, P., *Image and Logic*, *op. cit.*, pp. 45-46.
[2053] Dowling, D., « Experimenting on Theories », *Science in Context*, 1999, vol. 12, n. 2, pp. 261-273.

traitées statistiquement, visualisées en images, comme lors des expériences[2054]. Anouk Barberousse, Sara Franceschelli et Cyrille Imbert défendent, quant à eux, le pouvoir heuristique de l'ordinateur permettant d'examiner en détail les « niveaux sémantiques » qui composent les simulations[2055].
Si la simulation par ordinateur est un laboratoire d'un type différent, il est peut-être régi par des lois propres et il nécessite donc des stratégies argumentatives inédites. Sur le terrain des SSC, cette remarque de nouveauté mérite d'être relativisée. De manière similaire à ce que les philosophes Roman Frigg et Julian Reiss ont soutenu dans un article, la thèse de ce chapitre est bien plus « sobre »[2056]. Ces auteurs soutiennent que la nouveauté de la simulation demeure dans la sphère technique et pratique, mais qu'elle ne renouvelle pas totalement les questions épistémologiques, métaphysiques, méthodologiques et sémantiques, puisque les techniques et les pratiques liées à l'ordinateur posent les mêmes problèmes philosophiques que les sciences traditionnelles et modernes. Frigg et Reiss en appellent donc à traiter la simulation comme un nouveau terrain pour aborder d'anciens débats, et non comme un terrain déconnecté des autres territoires de la science et nécessitant une toute autre réflexion[2057].

Sur les modalités de l'administration de la preuve

Nous souhaitons montrer que ce sont les pratiques que les spécialistes des SSC ont appris à manier dans leurs disciplines d'appartenance qu'ils appliquent à l'exploitation de leurs résultats. Dans un article sur l'administration de la preuve, Chateauraynaud propose un dispositif conceptuel pour tenir ensemble à la fois le niveau formel, le niveau empirique et le niveau sociologique dans ce qui constitue la « tangibilité »[2058], que cela soit dans une controverse sociotechnique ou dans une controverse académique. Le sociologue propose de définir la « preuve » comme la conséquence d'un « réseau » de faits, d'objets et de personnes, où elle vient à servir d'image de l'expérience, sans être l'expérience elle-même, en soi irréductible. Chateauraynaud repère ensuite cinq *topiques de la preuve* : 1) l'attestation directe par les sens ou la

[2054] Winsberg, E., « Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World », *Philosophy of Science*, 2003, p. 70, pp. 105-125.
[2055] Barberousse, A., Franceschelli, S. & Imbert, C., « Computer simulations as experiments », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 557-574.
[2056] Frigg, R. & Reiss, J., « The philosophy of simulation », *op. cit.*
[2057] « By contesting novelty claims we hope to pave the ground for an analysis of simulations that fits into the panorama of problems we are familiar with and thereby contributes to an advancement of these debates » : *ibid.*, p. 596.
[2058] « Est considéré comme tangible, tout ce qui résiste aux variations perceptuelles, instrumentales et argumentatives auxquelles le soumettent des acteurs dotés de représentations et d'intérêts divergents » : Chateauraynaud, F., « L'épreuve du tangible. Expériences de l'enquête et surgissements de la preuve », dans Karsenti, B. & Quéré, L., *La croyance et l'enquête. Aux sources du pragmatisme. Raisons pratiques*, vol. 15, EHESS, 2004, pp. 167-194.

prise sur un phénomène ; 2) la logique de la *redondance* et du cumul des témoignages ; 3) la topique de la *corrélation statistique* dans un espace de calcul ; 4) le *modèle de confinement* et d'exactitude représentée par le laboratoire, où toute expérience est censée être reproductible ; enfin, 5) la topique du *raisonnement argumentatif*. Ces topiques peuvent se chevaucher et coexister, bien que selon la spécialité ou le domaine de recherche une forme dominante s'impose par rapport aux autres.

Dans ce qui suit, on a identifié quatre *régimes de l'administration de la preuve*, qui peuvent être classifiés dans ces cinq topiques, sans besoin d'en créer une sixième *ad hoc* : nous avons repéré le *régime de l'étalon-or*, le *régime statistique*, le *régime de la parcimonie* et le *régime de la rétroduction*. Cette liste qui reste non-exhaustive devrait suffire à corroborer la thèse selon laquelle la simulation numérique ne représente pas une nouveauté absolue sur le plan socio-épistémique par rapport à ce qui est connu et documenté ailleurs dans le domaine technoscientifique.

Régime de l'étalon-or

Prenons l'exemple de la plateforme BioEmergences, une Unité de Service et de Recherche du CNRS, située à Gif-sur-Yvette (Île de France) et dirigée par la biologiste Nadine Peyriéras. Cette équipe a été mise en place en 2005 grâce à des financements européens et de la Région Île-de-France[2059] sous l'égide du RNSC et de l'ISC-PIF, avant de se pérenniser sous forme d'USR portée par le CNRS et l'Institut de Neurobiologie Alfred Fessard[2060]. Elle trouve ses racines dans deux projets lancés en même temps que l'ISC-PIF et le RNSC, et prolongés jusqu'en 2009. Il s'agit d'*Embryomics* – « Reconstruire l'arbre généalogique des cellules d'un embryon dans l'espace et le temps »[2061] – et de *BioEmergences* – « Vers une santé personnalisée à partir de la mesure de la variation individuelle »[2062]. Dès 2005, à savoir depuis sa phase de projet, l'équipe de BioEmergences se pose le problème de la reconstruction digitale d'embryons *in vivo* et de leur modélisation *in silico*. Son objectif a toujours été d'enquêter, par des techniques de microscopie d'avant-garde et par des méthodes computationnelles, les éléments fondamentaux du développement embryonnaire, à savoir biochimiques et mécaniques. Cela afin d'ouvrir, à long terme, « la voie à de nouveaux types de schémas de dépistage pharmacologiques et toxicologiques »[2063]. S'inscrivant dans une « biologie intégrative », cette plateforme se donne pour objectif la « reconstruction des dynamiques multi-échelles d'organismes modèles à partir de

[2059] « La plateforme BioEmergences a été soutenue par la Région à hauteur de 2.320.603€ en 2010, 2011 et 2012 (projet d'équipements mi-lourds de 250 k€, projet d'équipements mi-lourds en 2011 de 2 M€ et projet de petits et moyens équipements de 70.603€), et représente le tiers des financements en investissement accordés au DIM » : Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.

[2060] Site officiel de BioEmergences : http://bioemergences.iscpif.fr/bioemergences/index.php.

[2061] Les archives des projets de l'ISC-PIF : http://archives.iscpif.fr/tiki-index.php?page=projects-fr.

[2062] *Ibid.*

[2063] Site officiel du laboratoire *BioEmergences* : http://bioemergences.iscpif.fr/bioemergences/index.php.

leur observation »[2064]. Le laboratoire possède une partie plus biologique et ingénieriste dans laquelle des embryons du poisson-zèbre (*Danio rerio*), de l'oursin marin (*Paracentrotus lividus*) et de l'ascidie (*Phallusia mammillata*) sont filmés par des microscopes pouvant scanner la totalité des strates de l'embryon, puis une partie technique de reconstruction de l'image et de stylisation des cellules composant les embryons, ainsi qu'une partie plus informatique de simulation numérique du développement des embryons. L'un des arguments que l'équipe de BioEmergences utilise dans ses communications scientifiques est celui de la production de *gold standard data*. Comme l'explique Peyriéras, l'étalon-or

> « est le résultat de la correction, le jeu de données parfait qui va te servir de référence, qui permet ensuite de comparer l'efficacité des algorithmes. Il y en a d'autres qui disent *ground truth*, la vérité de base. Les gens en informatique utilisent ça. C'est marrant, car [en biologie] on considère que ce qu'on peut faire de mieux c'est l'œil qui peut le faire, l'œil de l'expert. Mais si on fait construire un même *gold standard* à différentes personnes, elles ne seront pas d'accord »[2065].

Même si la biologiste explique que dans la communauté « on a coutume de dire que [le] *gold standard* a été validé par deux experts indépendants »[2066] et que cela est difficilement réalisable pour des raisons matérielles et de contraintes temporelles[2067], le travail de validation à la main que le jeu de données en or présuppose est le fruit d'un long travail perceptuel cumulatif dans lequel la connaissance tacite des biologistes détermine la *prise* qu'ils ont sur leurs objets d'étude. En outre, l'expression même de *gold standard data* ou de *gold standard test* est bien connue en médecine ou en statistique, dans lesquelles pour établir la validité d'un fait on prend comme comparaison le meilleur test de référence disponible – et qui donc est constamment remplacé au fil du temps. Ce terme est bien connu dans les deux cultures épistémiques représentées par l'équipe pluridisciplinaire de BioEmergences : celle biologiste et celle des ingénieurs. En outre, il relève de la première et de la quatrième topique de Chateauraynaud, celle de la *prise* sur les phénomènes, laquelle s'opère par *recoupements* dans l'espace confiné du laboratoire.

Dans l'économie de la robustesse scientifique du laboratoire, face au petit nombre d'expériences réussies sous le microscope, ce sont les statistiques qui représentent les *déplacements de la preuve* nécessaires à neutraliser le plus possible le taux d'erreurs et

[2064] Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.
[2065] Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.
[2066] *Ibid.*
[2067] Pour finir de compter les cellules « échappées » aux algorithmes dans la reconstruction des images microscopiques, un doctorant de BioEmergences a dû embaucher deux stagiaires pour pouvoir terminer sa thèse à temps. Imaginer de faire cela toujours en deux fois c'est virtuellement impossible, surtout dans un contexte de science sur projet.

à garantir « un résultat fiable... réellement fiable »[2068]. Sans les nombreux allers-retours des statistiques, aucune « science » ne pourrait être faite à BioEmergences sur les seuls recoupements effectués à travers la reconstruction de l'image par les algorithmes.

Régime statistique

Si le concept de *gold standard* se réfère au repérage des cellules qui composent l'embryon scanné par le microscope, le *régime statistique*, qui relève principalement de la troisième topique de Chateauraynaud et secondairement de la topique de la redondance, s'applique, toujours à BioEmergences, à la version digitalisée des embryons. Paul Villoutreix, ancien doctorant dans l'unité CNRS en question, nous a expliqué le rôle des analyses statistiques de son point de vue : elles lui servaient dans la comparaison entre la version digitale des embryons, qui ont nombre de paramètres libres qu'il faut fixer, et les données empiriques collectées à partir de la microscopie des embryons réels :

> « Dans le modèle il y a un certain nombre de paramètres libres, et on fait une exploration de toutes les variations possibles de ces paramètres-là. Et pour chacune des valeurs des paramètres, on mesure la distance entre la simulation et les données originales. Ça fait tout un paysage de validité du modèle et là-dedans on cherche l'endroit où le modèle est le plus proche des données. Ça c'est exploration des paramètres »[2069].

Les simulations, qui peuvent être effectuées 300 mille ou plusieurs millions de fois et qui sont lancées sur la grille de calcul européenne, n'ont pas seulement pour fonction de trouver des valeurs pour les paramètres libres. Elles ont aussi le rôle de compenser le faible nombre de scans d'embryons réalisés par le laboratoire : du fait de la difficulté de cette opération technique, la thèse de Villoutreix s'est basée sur cinq scans d'embryons d'oursin. Les statistiques ont servi ainsi à déterminer un embryon factice ou « barycentre »[2070], résultat de la moyenne des cinq embryons analysés, et à explorer l'espace de variation des paramètres sur celui-là.
Dans l'écosystème représenté par l'ISC-PIF, les groupes de recherche qui cotisent à l'UPS du CNRS, dont BioEmergences, ont le droit d'utiliser la plateforme OpenMOLE développée par Romain Reuillon et d'autres – plateforme qui ne va pas sans rappeler les grands projets de validation et de comparaison des modèles climatiques[2071] et que son fondateur souhaiterait insérer dans la boite à outils

[2068] Entretien avec Adeline Boyreau, 23.04.15.
[2069] Entretien avec Paul Villoutreix, 10.03.15.
[2070] *Ibid.*
[2071] Gates, W.L., Boyle, J.S., Covey, C., Dease, C.G., Doutriaux, C.M., Drach, R.S., Fiorino, M., Gleckler, P.J., Hnilo, J.J., Marlais, S.M., Phillips, T.J., Potter, G.L., Santer, B.D., Sperber, K.R., Taylor, K.E. & Williams,

internationales des SSC. Reuillon est coauteur d'un article avec un postdoctorant informaticien de l'institut, Guillaume Chérel, et une doctorante de Géographie-Cité, Clémentine Cottineau, sur un algorithme que les trois n'hésitent pas à qualifier de « poppérien »[2072]. À partir du constat épistémologique selon lequel la simple corroboration des modèles n'est pas suffisante à les valider, les auteurs font appel à une méthode algorithmique capable d'explorer les paramètres afin de falsifier les modèles en suivant les prescriptions de Popper. Selon les trois chercheurs, un algorithme qui peut produire des motifs inattendus fournit à la fois une méthode pour falsifier les modèles ou pour produire des prédictions à partir d'un modèle donné :

> « An approach to validation based on mere corroboration is insufficient to build robust explanatory and predictive models. […] How can we test the validity of a model ? We can make a useful detour by Karl Popper's falsifiability principle. A theory yields specific statements which it allows or forbids. Allowed specific statements, when confirmed by empirical validation, corroborate the theory. Forbidden statements falsify it. […] The individual simulations can be partitioned into two sets : those which correspond to empirical observation, and those which contradict it. Members of the former corroborate the model, while members of the latter falsify it. […] An unexpected pattern can either be a falsifier of the model if it is contradicted by subsequent empirical observation, or a prediction of the model if it is validated by it. To search for the unexpected patterns a model can produce in simulation is to search for both at the same time »[2073].

Dans son entretien avec nous, Chérel clarifie ce point. Le fait que la simulation du modèle produise le *pattern* attendu n'est pas, pour lui et ses collègues, une preuve suffisante pour faire confiance à la pertinence des hypothèses sous-jacentes. Les motifs inattendus sont ainsi recherchés par l'algorithme

> « en perturbant un peu aléatoirement les valeurs des paramètres et en cherchant parmi tous les paramètres possibles tous les comportements différents que je peux obtenir en sortie. Et donc dans ces comportements différents, s'il y en a auxquels on s'attendait pas, on peut se dire que soit ça va être des contre-exemples, qui nous permettent de faire chuter le modèle, soit des prédictions du modèle qu'on peut ensuite tester empiriquement ou par la collecte de données »[2074].

D.N., « An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP) », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, vol. 80, n. 1, pp. 29-55.

[2072] Chérel, G., Cottineau, C. & Reuillon, R., « Beyond Corroboration : Strengthening Model Validation by Looking for Unexpected Patterns », *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, n. 9, e0138212, doi:10.1371/journal.pone.0138212.

[2073] *Ibid.*, p. 2.

[2074] Entretien avec Guillaume Chérel, 06.07.16.

Le processus est vu comme itératif : un modèle est mis au point, ensuite on en explore l'espace des paramètres, puis la production de *patterns* imprévus permet de revoir le modèle et de recommencer le cycle jusqu'à ce que l'on parvienne à un modèle jugé comme satisfaisant par les modélisateurs. Lorsque les auteurs de l'algorithme se posent la question de comment explorer les paramètres pour faire en sorte de produire des motifs inattendus, ils expliquent la difficulté de manipuler des modèles de systèmes complexes par l'analyse des trois traits principaux qui les caractérisent : la grande liberté des paramètres, la non-linéarité et la stochasticité. Ce passage éclaire ce que les chercheurs et les chercheuses des SSC disent à propos de la multiplication des simulations, à savoir une manière de conduire des tests d'analyse de sensibilité[2075] :

> « Such an exploration is no trivial task due to the common difficulties with computer-based models of complex systems : the high dimensionality of the parameter space, non-linearity between inputs and outputs, and stochasticity. High dimensionality (tens or hundreds of parameters) makes the parameter space prohibitively big to try out all possible parameter values (or a regular sampling in the case of real valued parameters). Non-linearity entails that interesting output values may correspond to very small regions of the parameter space, making them difficult to look for. Stochasticity makes it necessary to replicate the simulations. For models which take several seconds to run in simulation, a clever exploration method to reduce the number of simulations is necessary »[2076].

Grâce à un algorithme génétique (appelé Pattern Space Exploration ou PSE) capable de produire de l'innovation à partir de nouveaux motifs, les trois chercheurs visent donc à renforcer les modèles, en les mettant à l'épreuve depuis plusieurs points de vue, à travers un usage spécifique des statistiques. En renversant la définition qu'Alain Desrosières donnait des statistiques, comme de « choses qui tiennent »[2077], le PSE sert à explorer les *choses qui ne tiennent pas* dans les modèles.
La règle de l'étalon-or et le *régime statistique* se soumettent à un principe plus général, qui est condensé dans ce que nous proposons de nommer le *régime de la parcimonie*.

Régime de la parcimonie

Le rasoir d'Occam, autre nom pour la parcimonie, est en usage dans toutes les sciences. C'est le principe épistémologique qui se trouve à la base de toute modélisation et qui consiste à expliquer un phénomène en invoquant le plus petit

[2075] L'analyse de sensibilité (*sensitivity analysis*) est monnaie courante chez les modélisateurs : il s'agit d'un savoir mathématico-statistique et informatique qui est appliqué à toutes les disciplines qui font usage de modèles computationnels. Il s'agit de l'étude de la manière dont l'incertitude de l'output d'un modèle peut être évaluée par rapport aux inputs.
[2076] Chérel, G. et al., « Beyond Corroboration », *op. cit.*, p. 3.
[2077] Desrosières, A., *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*, Paris, La Découverte, 2010, p. 18.

nombre de causes possible. S'il peut être invoqué implicitement ou explicitement dans pratiquement tout savoir dit scientifique, il devient une préoccupation constante et claire des modélisateurs computationnels des systèmes complexes[2078]. Il relève de la cinquième topique de Chateauraynaud, celle du *raisonnement argumentatif*, où des éléments de logique, d'esthétique et de pragmatisme viennent s'insérer dans les motivations des scientifiques. Mathieu Leclaire, informaticien à l'ISC-PIF et à Géographie-Cité, illustre ce principe ainsi : « avec très peu de mécanismes, j'arrive à expliquer quelque chose qui me semble très complexe à appréhender. […] Enfin, le moins tu as de mécanismes, le plus tu simplifies ton processus, et le plus tu arrives, je pense, à le comprendre »[2079]. Comme le dit autrement le bio-informaticien Guillaume Beslon, affilié à l'IXXI de Lyon, « [c]e qui est important dans un modèle ce n'est pas ce que tu mets dedans. Ce qui est important c'est ce que tu enlèves »[2080]. La démarche de ces chercheurs vise donc à éliminer tout paramètre et toute hypothèse qui ne sont pas indispensables à la production *in silico* du phénomène. Les méthodes computationnelles d'OpenMOLE servent à l'équipe des géographes, et pas seulement, à avoir « une méthode qui te dit à la fin : ce paramètre, il ne sert à rien. Ou il sert mais entre telle et telle valeur »[2081]. Ce qui fascine les modélisateurs dans les effets pratiques de ce principe, c'est le pouvoir explicatif :

> « le fantasme un peu qu'on a, c'est de pouvoir se dire qu'avec, en fait, très peu de mécanismes, on arrive à reproduire ces équations. C'est un peu dire […] tiens, s'il n'y avait pas eu tel truc, en fait ça se serait compensé avec d'autres paramètres explicatifs qui nous amènent au final à la même dynamique, au même scénario. […] le côté explicatif, il est déjà ultra-puissant, donc »[2082].

Cependant, la parcimonie n'est pas un but en soi pour tout le monde. La physicienne et épidémiologiste computationnelle, Vittoria Colizza, parle de la parcimonie comme d'un choix : selon les objectifs que l'on se pose et selon les matériaux disponibles, on choisit un modèle plutôt qu'un autre. En comparant deux modèles qui analysent les mêmes données, on comprend d'après elle lesquelles sont utiles et doivent être collectées davantage et lesquelles peuvent être délaissées :

> « Nous partons du cas réel, plein de complexité à plusieurs niveaux, nous cherchons à repérer les données les plus pertinentes. […] Nous cherchons à caractériser et synthétiser ces données. Ensuite nous développons des modèles, certains très

[2078] Voir par exemple : Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *Espace géographique*, 1997, vol. 26, n. 2, p. 132 ; Batty, M. & Torrens, P.M., « Modelling complexity : The limits to prediction », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2001, document 201.
[2079] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[2080] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[2081] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[2082] *Ibid.*

complexes, d'autres simplifiés. Certains n'ont pas de structure, chaque point correspondant à un individu, et tu ne sais pas qui est en contact avec qui, quel âge ils ont, rien. D'autres ont un modèle de contact, parce que tu as les données. Par la suite tu confrontes les données au modèle et tu vois si prendre en compte ces contacts est important ou pas. Si ce n'est pas important, c'est inutile que tu ailles les collecter, c'est inutile que tu augmentes la complexité de ton système. Ces allers-retours tu les fais constamment »[2083].

Dans un débat sur l'efficacité des méthodes par réseaux par rapport à celles par MBA, Colizza ne prend pas partie pour l'une ou l'autre dans l'absolu, en expliquant que toutes les deux ont des avantages et des désavantages. Les MBA, dit-elle, permettent d'avoir un degré de finesse dans la caractérisation des agents que les réseaux n'atteignent pas : « Je ferme les écoles ou pas ? Avec [la théorie des réseaux] je ne peux pas [répondre] »[2084]. Mais cette dernière, en étant plus parcimonieuse, lui semble fiable et efficace, par exemple dans la prédiction des dates approximatives des pics d'infectivité d'une pandémie au niveau planétaire, car le paramètre fondamental à gérer « est unique »[2085]. Tandis que, avec les MBA, « on a de multiples paramètres à explorer et ça devient plus complexe »[2086]. À côté de cet argument pragmatique, les scientifiques donnent parfois des arguments esthétiques liés à la parcimonie, source d'« élégance » : « Echo [un MBA programmé par John Holland] is kind of a caricature because I have kept the mechanisms few and quite primitive. My bias is that simplicity, and elegance if you will, help us to describe complexities, as they do in mathematics »[2087].
Selon Paul Chapron, modélisateur qui a accompagné Cottineau dans sa thèse sur un système de villes russes, le choix pour leur équipe a toujours été facile : « Alors le [modèle] meilleur pour nous c'est parcimonieux »[2088]. C'est-à-dire, le modèle minimal qui est capable d'expliquer un certain jeu de données. Par exemple, pour transformer en logiciel le phénomène de croissance des villes russes autour des exploitations de ressources fossiles, les modélisateurs ont mis au point une équation qui reproduit métaphoriquement l'effet Matthieu : *rich gets richer*. À travers une libraire de scripts qui déterminent des fonctions mathématiques de ce type, l'équipe essaie de parvenir à des mécanismes simulés de phénomènes géographiques considérés comme quantifiables et dotés d'un comportement régulier. La construction de la librairie ne se fait pas seulement de manière cumulative, car chaque étape doit être « compilée » : comme un informaticien utilise le compilateur pour tester ses lignes de code, les usagers d'OpenMOLE construisent leurs modèles avec ce que le groupe appelle « Step

[2083] *Ibid*.
[2084] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2085] *Ibid*.
[2086] *Ibid*.
[2087] Holland, J.H., *Hidden Order*, *op. cit.*
[2088] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.

Ways Modelisation »[2089]. Il s'agit d'un processus où l'apport de chaque étape ou brique de la construction du mécanisme[2090] est évaluée. Non seulement chaque brique doit être testée isolément, mais chaque interaction entre les briques à chaque nouvelle introduction doit être testée également. L'arrivée d'un nouveau paramètre bouleverse parfois les réglages internes au modèle *in silico*, d'où la nécessité de nouveaux paramétrages voraces de temps. Il est alors plus facile pour nous de comprendre l'intérêt que ces chercheurs et ces chercheuses ont pour la parcimonie : elle peut les aider à limiter les erreurs et les effets inattendus ou incompréhensibles du modèle, et à épargner du temps. Avec à la fois enthousiasme et auto-ironie, Chapron avoue le « petit fantasme » qu'il partage avec d'autres scientifiques de la complexité, à savoir celui de l'« équation maîtresse » :

> « plus le modèle est simple, plus il est facile à comprendre, plus il est facile à communiquer, plus il est facile à remettre en œuvre et plus on s'approche de l'équation maîtresse, qui est un petit fantasme des scientifiques tu vois, d'atteindre l'objet le plus pur possible… »[2091].

Reuillon explique pourquoi la parcimonie est une garantie, pour son équipe, d'éviter que les modèles produisent des résultats impossibles à interpréter et à valider :

> « j'ai compris que du coup si on complexifiait les mécanismes, si on rajoutait des mécanismes moins contraints, on allait se retrouver à pouvoir tout faire avec et que ces critères de parcimonie c'était une manière de pouvoir bien valider que c'était tel […] mécanisme qui fait ça et pas un autre »[2092].

Le prochain extrait d'entretien de Reuillon montre comment le régime de la parcimonie est en quelque sorte biface : il implique d'une part l'élagage pour aller à l'essentiel, d'autre part la défense de cet essentiel en tant que nécessaire :

> « on a testé ça sur chaque mécanisme dont un mécanisme [sur lequel] ils avaient un doute sur son utilité déjà avant. Et effectivement celui-là s'est montré pas nécessaire et on voyait que […] on pouvait faire la même chose avec d'autres mécanismes, [on voyait] qu'il était compensable complètement, et tous les autres n'étaient pas compensables. Dès qu'on enlevait un mécanisme, ça marchait plus. Ça c'est une autre forme de preuve qui est une forme de preuve de la nécessité »[2093].

[2089] *Ibid.*
[2090] Ou pour mieux dire : de l'écosystème de mécanismes différents, qui sont autonomes dans le codage, mais interdépendants pendant la simulation.
[2091] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2092] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[2093] *Ibid.*

D'après l'informaticien de l'ISC-PIF, les résultats issus du travail sur OpenMOLE ont été satisfaisants, car l'équipe aurait, selon lui, produit des modèles qui seront réutilisables et critiquables pendant longtemps :

> « Je pense que […] dans ce cadre-là, le modèle était parcimonieux et qu'on a montré que toutes les hypothèses qu'on a mis dedans étaient suffisantes et nécessaires pour reproduire le *pattern* qui était déterminé de manière quantitative, et bah ça a beau être des sciences basées sur l'archéologie, sur peu de données, tout ça, je trouve qu'on a fait un boulot rigoureux qui va être réutilisable, qui sera compréhensible pendant longtemps, qui sera critiquable »[2094].

Et Pumain d'ajouter : « En sciences sociales, quand on peut dire ça, c'est un petit peu un moment de bonheur »[2095].
Cottineau, Chapron, Reuillon, Leclaire et d'autres auraient aimé continuer à développer le modèle du système des villes russes, pour l'appliquer à l'Inde et à la Chine. La parcimonie, comme le dit Chapron, aurait eu l'avantage, dans ce cas, de diviser

> « le temps d'application, le temps de travail par un facteur gigantesque […] Honnêtement en deux mois c'était fait. Tu vois, on avait mis un an à faire le premier modèle, mais comme on a fait des briques génériques, composables et une famille polymorphe de modèles, l'appliquer à un nouveau pays pour lequel on a des données [cela aurait été facile] »[2096].

La parcimonie, enfin, est strictement liée à la conviction onto-épistémologique que « la théorie est transcendante »[2097], c'est-à-dire qu'elle dépasse les cas empiriques individuels : autrement dit, avec l'application du MBA de Cottineau à d'autres pays, « il aurait certainement fallu trouver le mécanisme propre à l'Inde mais qui, selon Chapron, […] n['aurait pas remis] en cause la théorie générale sous-jacente »[2098]. La théorie, en l'occurrence, est celle de Denise Pumain, qui décrit les villes comme des systèmes qui, parmi d'autres choses, interagissent selon un modèle gravitaire et se hiérarchisent selon l'effet Matthieu.

[2094] *Ibid.*
[2095] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2096] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2097] *Ibid.*
[2098] *Ibid.*

Le régime du backcasting ou de la rétroduction

La catégorie la plus typique des SSC porte le nom de *backcasting* ou de rétroduction[2099]. Terme apparu au début des années 1980 dans le domaine de la prospective, il est surtout utilisé dans la *culture épistémique* des statistiques et de l'analyse des données.

En quoi consiste donc le *régime de la rétroduction* ? Une synthèse éclairante est donnée par Chérel, Cottineau et Reuillon dans l'article déjà cité sur l'algorithme d'exploration falsificatrice des modèles : « A classical model validation approach is to write a model of the local scale dynamics and interactions, calibrate it, run simulations, and compare the outputs to the data »[2100]. L'ex-doctorant de Géographie-Cité, Antonio Ignazzi, le dit plus philosophiquement : « Le sens [de la rétroduction] c'est de voir si, à partir de toutes les données dont on dispose, nous réussissons à les mettre ensemble et à reconstruire un système de villes cohérent d'un point de vue holiste »[2101]. Le *régime du* backcasting intervient lorsque les scientifiques disposent d'un modèle et d'une série de données sur un système réel, et qu'ils doivent valider le premier sur les secondes. Afin de tester le modèle, les chercheurs et les chercheuses essayent de reproduire les données d'un instant T_2 en introduisant dans le modèle les données d'un instant T_1, donc antérieur. Leur raisonnement procède ainsi : lorsqu'à l'issue de la simulation, les données en sortie travaillées par le modèle à partir des données « réelles » de l'instant T_1 correspondent aux données « réelles » de l'instant T_2, alors on peut considérer que les hypothèses du modèle sont validées. Colizza explique le fonctionnement de la rétroduction en prenant le cas de la prédiction des pandémies :

> « Nous avons fait des tests *what-if*, par exemple en feignant que le réseau soit homogène : et nous avons vu qu'en effet les conséquences seraient très différentes. Nous avons validé le modèle sur l'épidémie de la SRAS de manière historique : nous avons ajusté le modèle avec des données seulement de l'épidémie à Hong Kong, avec ce *fit* nous avons vu si le modèle était capable de reproduire la propagation au niveau spatial. Et il l'a fait avec une bonne concordance par rapport aux résultats. Cela se fait facilement, avec des études postérieures, avec des données déjà collectées et confirmées et mises à jour et validées »[2102].

Selon Reuillon, pour que les géographes puissent dire d'un modèle que « ça marche », au début il fallait qu'ils « cliquent » et qu'ils voient la « bonne courbe »[2103]. Face à cela, l'on constate qu'il y a trois *cultures épistémiques* en jeu ici : l'informaticienne, la géographe et la statisticienne :

[2099] Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*, p. 120.
[2100] Chérel, G. et al., « Beyond Corroboration », *op. cit.*
[2101] Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.
[2102] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2103] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.

> « Ils étaient jamais arrivés à produire le *pattern* qu'ils voulaient voir. Grâce à toutes leurs connaissances théoriques de Denise [Pumain] et de toute une littérature, ils sont arrivés à faire d'un coup le modèle qui marchait. En termes d'informatique ça c'est une preuve, vu qu'on a trouvé un exemple, c'était une preuve que le modèle fonctionne. […] On voulait retrouver la *power law*, qui a été beaucoup observée en géographie. On a prouvé que les hypothèses étaient suffisantes mais moi ça me suffisait pas […] On voulait savoir si on ne pouvait pas enlever des trucs […] Du coup j'ai fait une autre méthode informatique un peu innovante […] qui permettait d'étudier l'impact de chacun des mécanismes sur le truc et ce qui était très surprenant c'est que tous les mécanismes étaient nécessaires […] ça c'est une preuve statistique »[2104].

Reuillon relate avoir été surpris de découvrir, lors de la collaboration avec les géographes, que ceux-ci, à travers leurs modèles, ne visaient pas la prédiction mais la compréhension. L'objectif n'était pas celui de prolonger « ce qu'on observait déjà », mais « de pouvoir trouver des règles qui reproduisaient les chemins qu'on trouvait [dans les données disponibles], que la connaissance était dans le modèle et pas dans ce que produisait le modèle »[2105]. Que la connaissance est dans le modèle plus que dans ses résultats revient à dire, pour Reuillon et les géographes, que « le modèle devient une espèce de description formelle de la théorie […] validable et répétable »[2106]. La rétroduction sert donc aux scientifiques à tester les hypothèses sur le fonctionnement du système réel, après qu'elles ont été traduites en langage informatique, et à « raconter une histoire »[2107] qui fasse sens en termes géographiques à partir de la simulation numérique : « Du coup si tu mettais une courbe sans avoir une fondation théorique derrière, ça n'avait pas beaucoup de sens. Il fallait du coup que ce mécanisme-là soit interprétable géographiquement et qu'on [puisse] raconter une histoire avec ce truc-là »[2108].
Les épidémiologistes computationnels, à la différence des géographes quantitativistes, font de la rétroduction pour utiliser les modèles testés à des fins prédictives. Vespignani attire notre attention sur un autre usage de la rétroduction, à savoir aider les modélisateurs à rechercher des paramètres libres : « tout d'abord, il y a tous les paramètres de la maladie, de l'infection que tu étudies, que dans certains cas tu dois

[2104] *Ibid.*
[2105] *Ibid.*
[2106] *Ibid.*
[2107] Reuillon cite ici le géographe quantitativiste anglais Michael Batty : « A particularly useful way of defusing the role of modeling is to consider the process of use as one of 'story telling'. The extent to which the story told is believable of course is always at issue but no matter what the model says about the past or the future, it tells a story » : Batty, M. & Torrens, P.M., « Modelling complexity », *op. cit.* Pour ce point, Batty cite à son tour Guhathakurta : Guhathakurta, S., « Urban Modeling as Storytelling : Using Simulation Models as a Narrative », communication au *World Planning Schools Congress*, Juillet 1-15, 2001, Shanghai, PRC.
[2108] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.

découvrir parce que tu ne les as pas »[2109]. Les paramètres libres sont les paramètres dont on n'a pas encore ou dont on ne peut pas avoir de données. Pour les épidémiologistes le paramètre libre par excellence est l'un des plus importants : l'infectivité. En ayant un certain nombre de données collatérales, dont la population, les mouvements des pendulaires, le nombre initial d'infectés et l'origine de l'épidémie, les modélisateurs visent à déduire à travers les simulations ce paramètre fondamental qui, une fois acquis, peut permettre éventuellement de proposer des anticipations.
D'une certaine manière, le *régime de la rétroduction* implique, dans une certaine mesure, les trois dernières topiques de la preuve définies par Chateauraynaud. Pour ce qui est de la *corrélation statistique*, la rétroduction vise à comparer les outputs statistiques des simulations avec les inputs statistiques collectés, reconstruits ou supposés. Pour ce qui est du *modèle du confinement* représenté par le laboratoire, l'on a vu que nombre de nos interviewés comparent la simulation précisément à un laboratoire synthétique : ils se comportent en traitant ce dispositif technico-théorico-empirique comme tel, et ce qui est cherché est précisément une certaine expérimentation, une relative reproductibilité et une forme de tangibilité. Quant à la topique du *raisonnement argumentatif*, souvent les modélisateurs explicitent leur *attitude métaphorique* beaucoup plus que ne le font des mathématiciens ou des physiciens théoriques par rapport au problème sémantique de leurs outils de travail. Pour ces derniers, les symboles entretiennent des rapports assez nets avec les référents : en modélisation par MBA ou par réseaux, en revanche, difficilement on entendra ou lira des discours où à un signe correspond directement un référent. Le plus souvent les scientifiques invoqueront des relations métaphoriques pour justifier le rapport entre les règles logico-mathématiques qu'ils inscrivent dans les scripts du logiciel et les hypothèses théoriques qu'ils ont à l'égard du fonctionnement du mécanisme du système complexe ciblé. Et comme le disait Reuillon, ce qui est important c'est de pouvoir interpréter les simulations pour raconter une histoire à partir des résultats.

Conclusion

Nous pouvons donc répondre à la question de savoir comment les scientifiques des systèmes complexes viennent à attribuer de la crédibilité à leurs simulations et comment ils la justifient face aux autres scientifiques et aux autres groupes sociaux. En contre-tendance avec la littérature SHS sur la simulation numérique, qui tend à soutenir que celle-ci met en place une manière totalement nouvelle de faire science, nous avons montré, par une démarche analytique, que les chercheurs et les chercheuses des SSC emploient des stratégies argumentatives en vigueur dans leurs disciplines de

[2109] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.

provenance. Les méthodes de l'administration de la preuve scientifique issues de la biologie, des statistiques et de l'informatique sont les plus employées, bien qu'elles ne soient pas certainement les seules.

Aparté 3 : Les données, le point aveugle de la philosophie des sciences numériques

Introduction

L'essentiel de la littérature sur la modélisation et la simulation numériques se concentre sur les phases de construction et de validation des modèles. Mais est-ce que la modélisation entendue comme processus de codage est au centre des pratiques en sciences computationnelles ? De nombreux travaux négligent les autres phases et les autres pratiques liées aux savoirs digitaux, qui précèdent, suivent ou accompagnent la modélisation et la validation de la simulation. En outre, cette littérature tend à passer sous silence les rapports complexes entre les différentes phases de la pratique modélisatrice.
Ce chapitre porte sur la description des phases et des pratiques de la modélisation-simulation, pour montrer que la collecte et la (re)construction des données représentent la partie de travail la plus importante de la modélisation computationnelle. C'est sur ce terrain-là d'abord que se jouent, en effet, l'articulation et l'inscription des savoirs acquis, des ontologies, des hypothèses du modèle et des équations mathématiques.

Les phases de la construction des modèles-simulations

Quel que soit le terrain sur lequel nous avons travaillé – biologique, géographique, épidémiologique ou autre – la phase de collecte et de (re)construction des données nous a paru la plus importante. Du point de vue des scientifiques, ce n'est pas forcément la première d'un point de vue logique et chronologique : le modèle ou les hypothèses qui vont confluer dans le codage du modèle numérique préexistent aux données. Dans le cas des *toy models*, les données ne sont même pas nécessaires. Le grand travail de collecte et de (re)construction des données concerne donc surtout, voire exclusivement, les modélisateurs qui ont une visée de réalisme (pas forcément pour prédire). Cela dit, le rapport entre données, modèles, validation et présentation du modèle dans les *arènes transépistémiques* est toujours un processus complexe, itératif et inachevé. Un certain modèle appelle certaines données, lesquelles posent des limites qui obligent les scientifiques à revoir les hypothèses du modèle ou qui contraignent les usages de celui-ci. Certains jeux de données peuvent suggérer aux chercheurs et aux chercheuses de nouveaux modèles ou hypothèses pour un modèle existant. On ne parle ici que du rapport données-modèles. Or, dans nos interviews, les scientifiques décrivent de nombreuses phases de la modélisation ; par exemple : la collecte des données, la préparation ou reconstruction des données, l'analyse des données, la

formulation des hypothèses, la modélisation, la simulation, la calibration du modèle, la visualisation des données, l'analyse des données de simulation, la validation du modèle, etc. En outre, les spécialistes des systèmes complexes mettent en garde contre une séparation nette et (chrono)logique entre ces phases, qui en réalité se chevauchent, ou se précèdent et suivent selon des logiques contre-intuitives, contextuelles, aléatoires, contingentes, liées à des connaissances tacites. Les sciences de la complexité, comme la plupart des sciences computationnelles, ont une dimension artisanale très forte. Le nom de « sciences des systèmes complexes » peut faire penser à de la *Big Science*, organisée en grandes structures, avec des équipes importantes et des procédures standardisées ; le volet numérique de ces savoirs peut faire penser à des savoirs techniques très automatisés. Or, il n'est en rien. Les mots d'Isabelle Stengers et de Bernadette Bensaude-Vincent sur les praticiens des simulations digitales sont très pertinents :

> « Il y a peu de controverses entre simulateurs car il y a peu de travail collectif. Les simulateurs sont rassemblés par l'équipement informatique qui leur est nécessaire, mais ils fonctionnent plutôt à la manière de petits artisans : chacun son problème, son modèle, son programme »[2110].

En suivant l'ordre (apparemment logique) des différentes phases de la modélisation, on ne fait qu'opter pour une présentation la plus simple possible. Des sous-sections seront dédiées en outre aux conceptions que les scientifiques des systèmes complexes ont de l'erreur et de la validation.

La collecte des données

Commençons par la collecte des données. Elle apparaît, dès le départ, comme une reconstruction, voire une fabrication tout court. Autrement dit, une fois collectées, les données ne peuvent pas être utilisées immédiatement. Elles doivent être transformées, retravaillées, agrégées. L'épidémiologiste computationnel Alessandro Vespignani explique que les scientifiques tirent souvent leurs données de bases auxquelles ils ont accès à travers une procédure particulière. Par exemple, dit-il, lorsqu'on se pose le but d'étudier des phénomènes collectifs, telle qu'une protestation de rue ou le succès d'un film, on peut se tourner vers les API : « Il s'agit des Advance Programming Interface, fondamentalement des portes ouvertes que ces services [comme Twitter, Facebook, etc.] te laissent pour que tu puisses interfacer tes programmes computationnels, afin de collecter des données et des métadonnées »[2111]. Cela bien sûr après être passés à

[2110] Stengers, I. & Bensaude-Vincent, B., *100 mots pour commencer à penser les sciences*, Les Empêcheurs de penser en rond, Paris, 2003, p. 382.
[2111] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.

travers les « Institutional Review Board », qui s'assurent que ce que les scientifiques font est « éthiquement raisonnable »[2112].

Mais le travail de la collecte des données peut être fait aussi en première personne par les chercheurs et les chercheuses. La géographe française Elise Beck, qui collabore avec des modélisateurs, relate comment la collecte de données s'est faite dans le cas du projet de modélisation géographique qui devait évaluer l'hypothèse (ensuite abandonnée) d'installer une Zone d'Action Prioritaire pour l'Air dans la ville de Grenoble. Au-delà des données d'ordre géographique repérées gratuitement chez l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (encore connu sous l'acronyme d'IGN) et celles achetées à la chambre de commerce et d'industrie sur la localisation des services, des commerces et des entreprises de Grenoble, « il y a des données qui n'existent pas, qu'il [faut] construire »[2113]. Des enquêtes « ménage-déplacement », indiquant les mouvements d'un ménage sur vingt-quatre heures, ont été conduites par le Syndicat Mixte des Transports par face à face avec quelques milliers de citoyens et citoyennes, utilisés comme échantillons représentatifs : « les gens disent, 'Je suis allé de telle heure à telle heure, de là à là, avec tel mode de transport et tel objectif' »[2114]. Ensuite, environ un dixième des entreprises, des services publics et des commerces de la ville ont été enquêtés directement par l'équipe des géographes impliqués dans la recherche ou par des étudiants, avec la finalité d'en collecter par Internet ou par téléphone les horaires d'ouverture et de fermeture. Maintenant, une fois collectées, les données doivent être homogénéisées, épurées, standardisées, en l'absence de quoi, selon certains auteurs, cela produit des travaux de mauvaise qualité :

> « Urban theories and models are too rarely tested on sets of data that are properly defined and standardized. Many contradictory results and some controversial papers in urban studies can be explained by a lack of attention paid to the quality and quantity of empirical data »[2115].

La (re)construction des données

La (re)construction des données est un processus complexe, long et semé d'embûches, qui demande plusieurs astuces pour être mené à bien. C'est ce qu'Emmanuel Didier a nommé les *pratiques de l'agrégation*[2116].

[2112] *Ibid.*

[2113] Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.

[2114] *Ibid.*

[2115] Pumain, D., Swerts, E., Cottineau, C., Vacchiani-Marcuzzo, C., Ignazzi, A., Bretagnolle, A., Delisle, F., Cura, R., Lizzi, L. & Baffi, S., « Multilevel comparison of large urban systems », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 706, mis en ligne le 17 janvier 2015, consulté le 29 mai 2018. URL : http://journals.openedition.org/cybergeo/26730, p. 2.

[2116] Didier, E., *En quoi consiste l'Amérique ? Les statistiques, le New Deal et la démocratie*, Paris, La Découverte, 2009, p. 22.

L'informaticien Paul Chapron, en parlant de la géographe Clémentine Cottineau, explique que le travail d'homogénéisation des données accompli par sa collègue a été fondamental pour assurer une calibration plus précise du modèle au cœur de la thèse doctorale de cette dernière :

> « Clémentine [Cottineau] avait fait un travail préliminaire très important, d'harmonisation des données censitaires des villes de Russie qui permettait de comparer l'état du système de l'URSS à toutes les dates. C'est très important cela parce que sans des données aussi harmonisées, aussi solides, cohérentes, la calibration aurait été moins forte »[2117].

Ce point est très important pour tous nos interlocuteurs. Parfois, comme le témoigne une mathématicienne et épidémiologiste computationnelle du LANL, certaines modélisations ne peuvent pas être faites, non pas par manque de données, mais par manque de bases de données homogénéisées et exploitables[2118]. La chercheuse prend l'exemple d'une donnée disponible mais fortement hétérogène : celle relative aux moustiques qui sert à la modélisation des épidémies liées à ce vecteur. Les données dont elle a disposées pour une recherche ont été collectées de manières différentes et un travail d'homogénéisation a été nécessaire. Cela, explique-t-elle, n'est possible qu'une fois que l'on a compris comment les données ont été collectées au cas par cas :

> « a lot of times […] there is the data fusion issue […] mosquito data for example is all centered at the county level. And so there is no central repository. It's on different days, it's with different traps […] so if you try to put it together you have to do a lot of work to say, 'Okay this people collected data in this way, this people collected data in this way' […] and somehow it's an art quite frankly »[2119].

L'« art » auquel elle fait référence – et qui confirme le caractère artisanal des sciences computationnelles, qui sont loin d'être automatisées – demande du temps, et un effort cognitif et social remarquable. Le processus d'homogénéisation, que la chercheuse appelle « smoothing » (lissage), nécessite d'aller parler avec les personnes qui collectent les données sur le terrain, pour voir quels pièges elles ont utilisées, quelles espèces ont été collectées, dans quels pourcentages, afin de créer une mesure unique pour toute la base de données. Le géographe quantitativiste Arnaud Banos, directeur de Géographie-Cités, en arrive à dire que la nouveauté des *Big Data* « n'est pas tellement la masse, le problème c'est plutôt le fait qu'elles sont dans des formats qu'on ne maîtrise pas »[2120]. Selon le chercheur, ces données « tarissent » rapidement, malgré

[2117] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2118] Entretien avec anonyme.
[2119] *Ibid.*
[2120] Entretien avec Arnaud Banos, 01.03.17.

leur richesse (contenu, variété, échelles), à cause du fait que « tu n'as pas du tout contribué à leur production. Et tu n'as aucune idée des propriétés de ces données »[2121]. Antonio Ignazzi, ex-doctorant du laboratoire dirigé par Banos, fait mention de la nécessité de croiser les données pour les vérifier et de la possibilité de contacter les autorités, lorsque les données ne sont pas bonnes : « Je prends mes données, je les organise, je les filtre (parce que je dois voir si elles sont véritables, je les croise, je les vérifie) ; si elles ne sont pas bonnes, je contacte les autorités qui t'indiquent d'autres sources »[2122]. Cela parce que, comme le dit Pumain, « quand on voit des grosses anomalies, on va voir s'il y a pas une erreur de données. Parfois il y a des villes qui portent les mêmes noms »[2123].
Un informaticien et épidémiologiste computationnel basé au LANL définit la problématique de la standardisation des données comme douloureuse (« painful »[2124]). Dans un article dédié à cette thématique et coécrit avec sept collègues[2125], il a plaidé pour que les départements de santé publique rendent accessibles leurs données (parfois « cachées ») de manière plus homogène, afin de faciliter le travail des modélisateurs et des décideurs politiques[2126]. Un de ses collègues informaticiens explique que le format même des données a une allure différente d'un pays à l'autre : « So for a lot of countries you can get like SVC spreadsheet files, other countries it's PDF tables : it really varies by country »[2127]. Un jeune biologiste et modélisateur, collègue des précédents, a développé une expertise sur les différences que l'on peut rencontrer, lorsqu'on collecte des données à partir de plusieurs départements de santé publique du monde :

> « what I know really well is how different countries in reality report things out. […] when someone says 'suspected case' or 'confirmed case', what does that mean ? When they say 'Epi week 32' in Japan what day does that actually refer to ? And when they say it in another country it means a slightly separate case »[2128].

Les juridictions changent d'un pays à l'autre et, avec elles, les définitions des termes techniques. Depuis Desrosières l'on sait que les *Statistik*, à l'origine un instrument d'État comme leur nom l'indique, ne sont pas neutres et que les catégories des entités qu'on mesure et qu'on analyse mathématiquement sont toujours négociées et négociables. Ce chercheur en est conscient par la pratique qu'il a des statistiques de

[2121] *Ibid.*
[2122] Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.
[2123] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2124] Entretien avec anonyme.
[2125] Fairchild, G., Tasseff, B., Khalsa, H., Generous, N., Daughton, A.R., Velappan, N., Priedhorsky, R. & Deshpande, A., « Epidemiological data challenges: planning for a more robust future through data standards », 2018, eprint arXiv:1805.00445.
[2126] Entretien avec anonyme.
[2127] *Ibid.*
[2128] *Ibid.*

différents pays. Les asymétries dans la puissance et dans l'efficacité des infrastructures représentent une autre source de difficulté : les monitorings et les reports sur les épidémies n'arrivent pas au même moment partout. Le biologiste du LANL plaide non seulement pour une standardisation des langages et des catégories entre pays ; l'idéal pour un épidémiologiste computationnel serait aussi qu'il y ait une homogénéité dans les infrastructures, pour assurer la même quantité et la même qualité de *Big Data* partout dans le globe.
Un mathématicien basé également au LANL explique que la non-homogénéité des données est déjà assez embêtante au niveau des États-Unis[2129]. Le transfert des données relatives aux cliniques et aux hôpitaux vers la Ville, puis vers la Région, l'État et enfin le Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (qui est fédéral), crée une dégradation et une diversification de ces données qui les rend moins facilement exploitables. Le chercheur préférerait pouvoir recevoir les données directement des cliniques et des hôpitaux. Le problème de la *privacy* s'impose toutefois. Aussi, plaide-t-il pour une exception gérée collectivement pour le bien du *forecasting* épidémique et du bien être collectif : « I want to know : are people going to come to my hospital this week and am I going to have the beds available to actually be able to put them in ? »[2130]. D'après le mathématicien, rester au niveau local pour la collecte et la transmission des données ne faciliterait pas seulement le travail d'organisation des données aux modélisateurs, mais permettrait aussi une prédiction épidémique plus précise, qui bénéficierait au niveau local lui-même. Avoir une prédiction régionale ou étatique est, selon lui, aussi utile qu'une prévision météo régionale ou étatique :

> « I just wouldn't trust any forecaster with that level of irregularity. […] [A forecast] at city level […] would be far more useful than […] [at] the United States level. That doesn't tell me if I need to bring an umbrella you know, to work the next day, because it might rain average across the United States the next day. Like that it's just not useful »[2131].

Pour rester dans l'épidémiologie computationnelle, mais en quittant Los Alamos et en revenant à Boston, Vespignani explique que les données doivent parfois être agrégées, ce qui porte de fait les scientifiques à créer une nouvelle donnée. Il l'appelle une « méta-collecte » de données, lorsque par exemple il agrège, avec son équipe, les données des compagnies aériennes et les données géographiques du globe : la nouvelle donnée peut ensuite être partagée à son tour à travers les plateformes publiques que ces épidémiologistes computationnels produisent et mettent en ligne[2132]. La question du

[2129] *Ibid.*
[2130] *Ibid.*
[2131] *Ibid.*
[2132] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.

partage des données est hautement politique car, comme le dit Vespignani lui-même, son équipe et bien d'autres collègues du domaine de la théorie des réseaux militent pour l'*open data*. Parfois certaines bases de données sont privées et, même si c'est à des fins de recherche, elles leur coûtent chères :

> « nous sommes des grands soutiens du mouvement *open data* parce que nous voulons qu'il y ait un accès libre à ces données. Plus l'accès est fermé, plus la science ralentit, plus en fait la science ne se fait plus dans les lieux publics et gouvernementaux, mais elle se passe dans les compagnies qui peuvent se permettre d'acquérir ces données de manière commerciale, donc ce que nous faisons c'est de chercher de redistribuer les données »[2133].

À part l'homogénéisation et l'agrégation des données, il peut y avoir aussi une transformation des données, par exemple lorsque certaines cartes sont trop détaillées – ce qui est un problème donc spéculaire vis-à-vis de celui que décrivait l'un des chercheurs du LANL. Souvent Vespignani et ses collaborateurs doivent passer de cartes 1 km par 1 km à des cartes 20 par 20, voire moins détaillées encore, et ce « selon les connaissances que l'on a de cette population-là »[2134]. Ces transformations ne se font jamais au seul nom de la standardisation, elles se font toujours dans un cadre théorique qui les justifie.
Un exemple de transformation et d'agrégation de données sous contrôle théorique est donné par la physicienne et épidémiologiste computationnelle Vittoria Colizza, basée à l'INSERM de Paris – elle collabore avec Vespignani depuis le temps de son postdoctorat étatsunien. Dans la construction de la base de données de la population, elle dispose d'une seule source homogène et exhaustive pour les vols du monde entier, mais en même temps une variété de sources non-homogènes et incomplètes, provenant des différents instituts statistiques nationaux du monde, pour ce qui concerne les données des déplacements pendulaires. Nous disions que la phase de collecte et (re)construction des données était l'une des plus importantes. Certainement elle n'est pas négligeable du point de vue du temps de travail qu'elle implique : « Deux ans de travail de collecte de données et d'analyse-homogénéisation »[2135]. Les bases de données collectées étaient une « quarantaine »[2136], contenant « Europe et Amérique du Nord, quelques pays de celle du Sud, quelques pays de l'Asie. L'Afrique était absente pour des raisons évidentes »[2137]. En se basant sur des recherches en géographie, la chercheuse et ses collègues ont appliqué le « modèle *gravity law* » pour traiter les données des pendulaires, puisque les déplacements tendraient à aller toujours vers le

[2133] *Ibid.*
[2134] *Ibid.*
[2135] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2136] *Ibid.*
[2137] *Ibid.*

point voisin le plus grand (les grandes villes étant plus attractives, au sens de la métaphore newtonienne). Mais que faire des autres 180 pays qui manquaient à l'appel ? C'est vite dit : « Un modélisateur modélise les données qu'il a et puis il les applique aux points qui manquent »[2138]. Puisque chaque pays est toutefois différent, cette opération pourrait paraître abusive. Toutefois il y a encore un atout, dû aux régularités « intrinsèque[s] » aux aires géographiques : « nous sommes partis des aéroports, en les considérant comme des bassins d'attraction d'un certain type de mobilité […] En gros, le pendulaire entre Turin et Milan ne se comporte pas de manière différente par rapport à un pendulaire colombien »[2139]. Or, si pour l'Afrique les chercheurs et chercheuses disposent de données aériennes et démographiques, en revanche les données des déplacements pendulaires et la distribution précise de la population manquent. Une base de données des images satellitaires de la NASA, issue du projet *Gridded Population of the World*, offerte par la Columbia University semble être un autre *deus ex machina* dans le processus :

> « Nous avons utilisé une autre base de données de la Columbia University qui cartographie toute la population [mondiale] sur une grille avec des degrés de résolution différents, même à quelques centaines de mètres […] À chaque petit carré est associée une population. [Il s'agit de] données produites par les images satellitaires de la NASA, avec quoi l'on mesure la densité de la lumière émise, puis on calibre sur les populations connues de chaque pays, parce qu'il y a évidemment un problème d'usage de la lumière »[2140].

On parle normalement d'hypothèses lorsqu'on aborde la construction du modèle. Mais la seule (re)construction des données implique déjà un certain nombre d'hypothèses. Elise Beck illustre ce point, en expliquant que, pour construire des MBA, il faut une dizaine de couches de données : « Réseau routier, réseau cyclable, réseau de bus, de tram, les arrêts, […] les ressources urbaines (commerces, services), les bâtiments, la population, les limites administratifs »[2141]. Chacune de ces couches comporte des informations diverses et variées, qui doivent être coordonnées par l'œil expert du géographe : « Toutes ces informations, il fallait qu'elles soient organisées sous un certain format. Et même la construction de cette base de données spatiales, ça a demandé une réflexion, un travail, et c'est là-dessus que je suis le plus intervenue »[2142]. Qui plus est, les données travaillées sont à tester périodiquement, à travers le croisement avec d'autres données partiales mais complémentaires. Une deuxième manière de contrôler les données, d'après Vespignani, c'est l'analyse de la sensibilité :

[2138] *Ibid.*
[2139] *Ibid.*
[2140] *Ibid.*
[2141] Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.
[2142] *Ibid.*

« c'est-à-dire, disons que dans le 20% des lieux je me suis trompé de 10%. Qu'est-ce qui arrive dans ma vision de l'épidémie ? Si je me suis trompé avec la population, qu'arrive-t-il ? »[2143]. Ceci, d'après Vespignani, permet aux scientifiques de tester la « tolérance du modèle » vis-à-vis du « bruit que l'on a dans les données »[2144]. Autrement dit, plus on a de détails, plus il faut contrôler la qualité de ces détails, avant de leur faire confiance. Cette pratique rappelle la « prévision des erreurs de la prévision » (*forecast of the forecast error*), dont parle Paul Edwards à propos des sciences du climat[2145]. Enfin, Vespignani explique que chaque année et demie il faut tout reconstruire, parce que la base de données a changé. Les données ne sont donc pas seulement mises à jour, mais reconstruites périodiquement. Face à ces témoignages, l'on ne peut que remarquer avec étonnement le déplacement conceptuel que cela représente entre la philosophie des Latins, qui voyaient dans la donnée un *datum*, à savoir quelque chose qui se donne, déjà fait, déjà accompli, et la réalité pratique que ces extraits d'entretiens montrent. Plus qu'un *datum*, les données de nos scientifiques rappellent un corps ou une machine qui pulse, qui change, qui bouge, et que l'on ouvre périodiquement pour y voir à l'intérieur et la corriger, enrichir ou soigner :

> « dans des modèles comme le nôtre cette chose [reconstruire les données] il faut la faire chaque année et demie […] dans certains pays de l'Afrique, ça bascule en cinq ans de 10%, au sens de la croissance, mais aussi dans le sens de comment [les populations] sont distribuées entre les pays […] Nous avons dû enlever de la base de données l'Iraq, l'Afghanistan pendant plusieurs années et puis à un moment donné on les a remis dedans »[2146].

Prenons maintenant le cas de la biologie du développement. Avec le but de réconcilier la biologie théorique et la biologie expérimentale à travers la « reconstruction phénoménologique »[2147], l'équipe de biologistes et ingénieurs de Nadine Peyriéras à BioEmergences profite de microscopes d'avant-garde pour scanner les embryons de plusieurs animaux-modèle et repérer les déplacements des cellules pendant leur développement. L'équipe souhaiterait parvenir à des « lois » plus ou moins générales pour saisir le rythme de la prolifération cellulaire, le chemin parcouru par les cellules et l'interdépendance des phases de développement embryonnaire. C'est à ce niveau que l'on parle de modèle : il s'agit d'un ensemble d'équations qui expliquent et permettent de prévoir certains comportements du système sous observation. Or, l'effort qui sert à passer du scan à une image digitalisée est riche de frictions, car elle

[2143] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2144] *Ibid.*
[2145] Edwards, P., *A Vast Machine*, *op. cit.*, p. 284.
[2146] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2147] Peyriéras, N., « La reconstruction phénoménologique est-elle une étape utile voire nécessaire d'une reconstruction théorique en biologie? », Résumé de l'exposé donné au Séminaire de Biologie Théorique du CREA, 14 décembre 2010, en ligne : https://biotheo.wordpress.com/2010/12/10/nadine-peyrieras/.

passe par un long travail par algorithmes[2148]. Lorsqu'ils sont sous la « loupe » du microscope[2149], les embryons tournent sur eux-mêmes plusieurs fois pendant toute l'opération de scan, qui peut durer quelques heures, voire un jour, selon l'espèce modèle. L'algorithme d'enregistrement des vidéos doit alors faire en sorte de corriger les mouvements des embryons, faute de quoi le suivi des cellules serait impossible. Cet algorithme superpose les images pour que le déplacement de l'embryon ne soit pas une entrave au suivi cellulaire. Une fois la vidéo acquise, la première phase de reconstruction des données est le dé-bruitage pour l'amélioration de l'image. L'algorithme *Geodesic Mean Curvature Flow* vise à préserver la position des frontières qui définissent la forme des structures cellulaires. Pour faciliter le suivi de l'évolution des cellules, l'équipe injecte de l'ARN fluorescent dans les embryons. Toutefois cela crée un halo autour des cellules qui rend confuses les images et difficile la détection des noyaux. Selon le témoignage du biologiste Dimitri Fabrèges, ex-doctorant de l'équipe BioEmergences, cet algorithme « va reconnaitre les endroits où il y a des formes sphéroïdes, plus ou moins convexes, et à partir du moment où ce n'est pas convexe, il le considère du noir. Mais si c'est convexe il va mettre une tâche »[2150]. La détection de la position des cellules se fait grâce à la détection des noyaux. Deux algorithmes, le *Difference of Gaussian filtering* et le *Flux Based Level Set*, s'occupent de repérer les noyaux et de nettoyer les contours en fournissant une image plus claire[2151]. La segmentation des cellules est assurée par le *Subjective Surfaces method*, qui sert à compléter les contours des noyaux, là où l'image restitue des cellules avec des membranes manquantes ou des noyaux superposés. De façon automatique l'algorithme détecte les membranes, bien que dans les images celles-ci puissent paraître incomplètes ou trouées[2152]. Le suivi des cellules ou *cell tracking* représente le point de passage obligé pour parvenir à un modèle digital. Photo par photo de la vidéo brute, toutes les cellules doivent être repérées et leur déplacement signalé. Il n'y a pas que le déplacement, beaucoup de cellules se divisent et quelques-unes meurent. Le suivi est d'abord automatisé et se fait par le *Simulated Annealing*[2153]. Puisque cet algorithme est loin d'avoir une performance parfaite, le biologiste doit ensuite vérifier à l'œil le résultat de ce processus. Ce travail perceptuel aux prises avec les images peut se faire de différentes façons : une ex-doctorante de l'équipe, qui travaillait sur l'ascidie, nous disait préférer « de suivre une seule cellule dans le temps,

[2148] Page sur les services, section traitement des images, du site officiel du laboratoire *BioEmergences* : http://bioemergences.iscpif.fr/bioemergences/image-processing.php.
[2149] Les guillemets s'imposent car la détection des images se fait par des lasers et non pas par une loupe à proprement parler.
[2150] Entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.
[2151] Le *DoG*, en particulier, fonctionne ainsi : « Ton noyau ressemble à une gaussienne. Un noyau est un mélange des deux gaussiennes, une petite et une grande. Quand le *DoG* a les deux superposés autour d'un point, il dit qu'il a trouvé un noyau. La première est corrélée à la distance entre les noyaux, donc celle-ci définit la taille de ton noyau, et l'autre définit la taille de la cellule » : *ibid.*
[2152] *Ibid.*
[2153] *Ibid.*

plutôt que de repérer toutes les cellules à un seul pas de temps »[2154]. Après l'effort conjoint du *Simulated Annealing* et de l'humain, le contrôle du résultat se fait grâce au logiciel *MoveIt* conçu par Thierry Savy, un informaticien de l'ISC-PIF. Ce logiciel de visualisation superpose des cubes et des lignes aux cellules et à leurs trajectoires, l'image brute restant sur le fond (fig. 19). La réussite de l'algorithme dépend de la qualité de l'image : le biologiste doit ensuite valider ou corriger la « proposition » avancée par l'algorithme[2155]. À la fin de ce processus, les scientifiques parviennent à une vidéo des trajectoires colorées qui se déplacent dans l'espace et dans le temps et qui sont analysées statistiquement. Les chaines de traduction opérées par les algorithmes et les humains dans ce processus d'acquisition et de reconstruction des données, nécessitent quelques jours pour s'achever. Sans cela, le même travail prendrait des années. L'un des doctorants de l'unité a disposé de deux recrues à temps plein, payées en intérim par le laboratoire, qui ne se sont occupées que de compléter à la main le suivi cellulaire incomplet[2156]. Fabrèges avait calculé que, pour ses dix-huit jeux de données et sans les dispositifs numériques, il lui aurait fallu trois ans de travail à temps plein[2157].

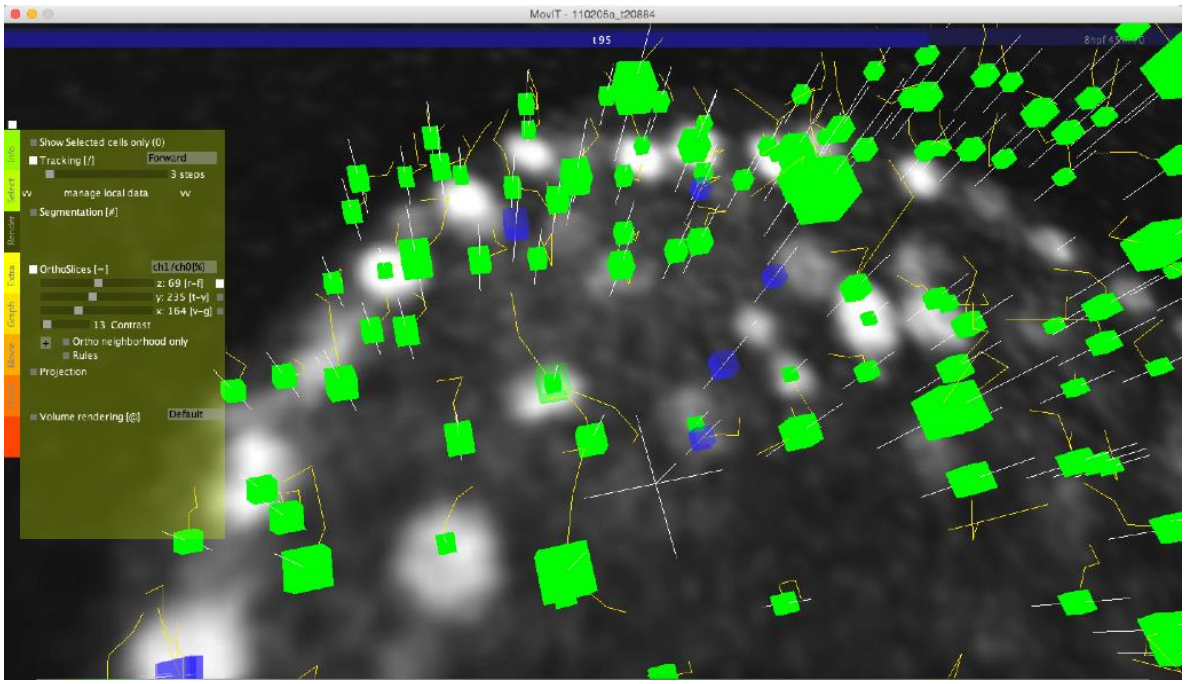


Figure 19. Le logiciel de visualisation du suivi cellulaire, MoveIt

Dans les termes d'Edwards, tous ces exemples montrent l'extrême difficulté de *rendre les données globales* : la tâche de parvenir à des modèles où ces sources hétérogènes sont unifiées et rendues commensurables rencontre en effet plusieurs *frictions de*

[2154] Entretien avec Adeline Rausch, 23.04.15.
[2155] Entretien avec Nadine Peyriéras, 23.04.15.
[2156] *Ibid.*
[2157] Entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.

données et *de calcul*. La collecte et (re)construction des données est donc une phase importante et difficile, quels que soient les domaines de recherche ou les manières de l'aborder. En revanche, selon la *culture épistémique* ou le laboratoire en question, la conception des phases de la modélisation et de la simulation peuvent varier. En outre, standardiser, homogénéiser, agréger, épurer sont toutes des activités qui demandent du choix, de la décision, comme l'écrit Emmanuel Didier dans son livre sur l'Amérique :

> « il est impossible de faire des calculs sur des données hétérogènes. À partir du moment où les chiffres ne parlent pas de la même chose, toutes les formules algébriques deviennent inutiles. La seule opération qui reste possible pour synthétiser de telles données est alors le jugement. Les membres ne calculaient donc pas, ils décidaient »[2158].

Didier a nommé ce phénomène l'*apurement* (ou *editing* en anglais), qu'il commente de la manière suivante :

> « Ainsi, contrairement à ce que l'on croit souvent, le travail statistique n'est pas uniquement régi par des règles et des procédures mécaniques. L'apurement, qui en était une étape incontournable, en est un exemple. […] C'est pourquoi il ne pouvait être effectué que par *jugement* du Statisticien »[2159].

Le « triangle épistémologique » de BioEmergences

Pour continuer avec les biologistes du développement, le site Web de BioEmergences affiche un « triangle épistémologique » (fig. 20), qui vise à synthétiser la démarche de recherche du laboratoire[2160]. En partant de l'angle en bas à gauche, les « données brutes en quatre dimensions » (*raw data*) issues du microscope vont être paramétrées par l'analyse et le traitement des données pour parvenir à ce que ces scientifiques appellent « reconstruction phénoménologique ». Par le biais du logiciel de visualisation *MoveIt*, la reconstruction peut être digitalisée, ce qui amène à la « phénoménologie augmentée » (en référence à la réalité augmentée des informaticiens), qui permet de retourner sur les images brutes avec une « interprétation supplémentaire »[2161]. Sur la ligne de gauche qui va des données brutes à l'analyse des données, puis à la reconstruction phénoménologique, jusqu'à la production de concepts et d'hypothèses, l'on parvient enfin à une « reconstruction théorique » qui ne représente rien d'autre que le modèle à proprement parler. Pour tester la validité de son modèle statistique, Villoutreix par exemple effectue une moyenne de ses cinq

[2158] Didier, E., *En quoi consiste l'Amérique ?*, *op. cit.*, p. 64.
[2159] *Ibid.*, p. 43.
[2160] Page sur l'expertise du site officiel du laboratoire *BioEmergences* : http://bioemergences.iscpif.fr/bioemergences/expertise.php.
[2161] Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.

embryons d'oursin, afin de trouver le « barycentre »[2162]. Celui-ci symbolise l'oursin digital ou le prototype, par le biais duquel le doctorant pourra décrire avec plus de précision le comportement de chaque oursin concret. Le prototype, étant moins distant de chacun des oursins réels, les décrira mieux que si le chercheur voulait décrire un oursin concret à partir d'un autre oursin concret. L'embryon digital, censé reproduire statistiquement *in silico* l'embryon réel, est donc le produit de toute une série de petits déplacements ou d'une série de phases intermédiaires qui sont intégrées dans le modèle. La flèche qui, du sommet, descend à droite vers la « morphogénèse virtuelle » grâce à la simulation numérique, laisse bien entendre qu'il y a un deuxième embryon digital qui ne dérive pas directement des données brutes, comme celui de Villoutreix, mais d'un travail théorique. La « morphogenèse virtuelle » représente la phase de construction de la simulation : Julien Delile, ex-doctorant polytechnicien à BioEmergences, a basé sa thèse sur cette phase et sur la construction d'une simulation appelée *MecaGen* (de l'assemblage entre théories mécaniques et théories génétiques)[2163]. Dans le but de l'évaluer, Delile a adopté deux démarches différentes. Dans la première, il assume que l'embryon d'oursin possède certaines caractéristiques morphologiques et, après avoir paramétré sa simulation, il surveille qu'elle reproduise ces caractéristiques. C'est une procédure qui se fait à partir d'une série d'hypothèses issues de la littérature ou du travail de l'équipe de BioEmergences. La validation de la simulation est réalisée, par conséquent, en surveillant trois aspects de l'embryon virtuel par rapport à l'embryon digitalisé : la sphéricité de l'embryon, la persistance de l'épithélium monocouche[2164] et la similarité entre les formes des frontières de l'inter-sous-population (c'est-à-dire entre les cellules d'un même embryon)[2165]. Dans la deuxième démarche, le simulateur peut comparer le *simulat* aux données originales, c'est-à-dire à l'embryon numérique, et là aussi « la simulation est bien faite si la forme correspond »[2166]. La « virtualité augmentée » de l'angle en bas à droite du triangle épistémologique représente la simulation finie et utilisable pour produire des *simulats*. Selon Peyriéras, en variant les paramètres, dans la simulation « on peut faire ce qu'on veut : tu peux faire collapser un embryon, tu peux le faire éclater », l'objectif étant de pouvoir parvenir à des prédictions[2167]. Sur le long terme, l'équipe espère arriver à un moment où « éventuellement une ou deux vérifications [soient réalisées sur] des vrais

[2162] *Ibid.*

[2163] Delile, J., *Des comportements cellulaires à la morphogenèse embryonnaire : modélisation mécano-génétique et simulations computationnelles du développement animal précoce*, sous la direction de Nadine Peyriéras et René Doursat, Université Paris Diderot (Paris 7), thèse soutenue en 2013.

[2164] La membrane séparant l'intérieur de l'animal de son extérieur.

[2165] Villoutreix, P., Delile, J., Rizzi, B., Duloquin, L., Savy, T., Bourgine, P., Doursat, R. et Peyriéras, N., « An integrated modelling framework from cells to organism based on a cohort of digital embryos », *Nature Scientific Reports*, 2016, n. 6 : 37438, doi : 10.1038/srep37438.

[2166] *Ibid.*

[2167] Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.

individus, mais [de laisser] le principal [aux] simulations »[2168], ceci pour une meilleure reproductibilité des expériences[2169].

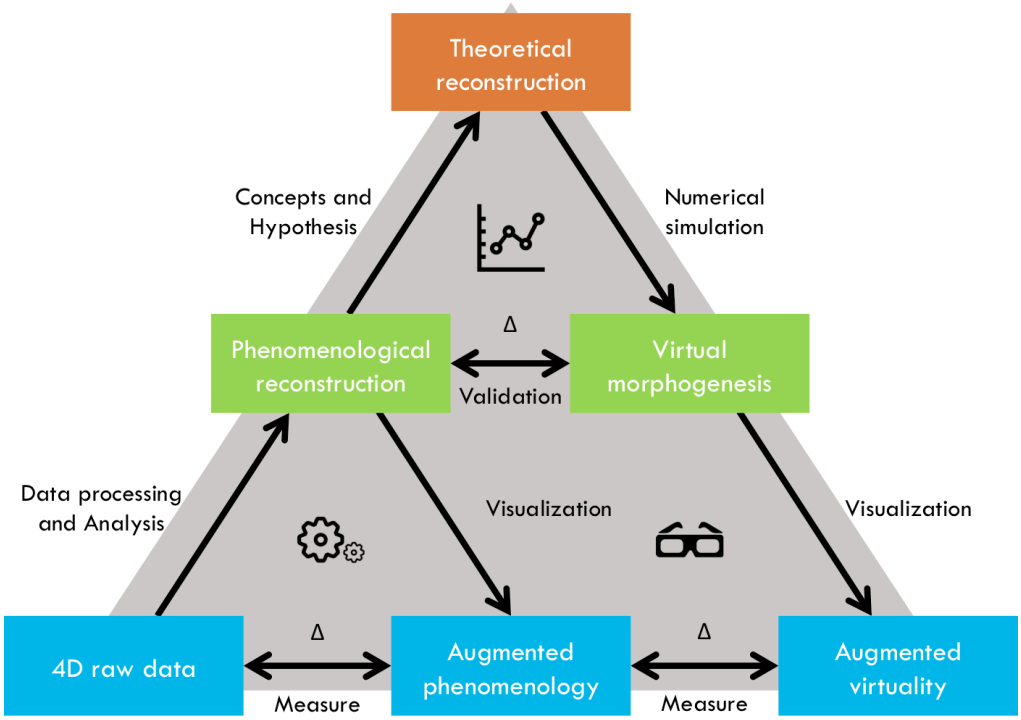


Figure 20. Le triangle épistémologique de BioEmergences

Les phases de la modélisation en géographie quantitative

Les géographes entendent les phases de la modélisation-simulation d'une manière différente. Luis Bettencourt et Geoffrey West au SFI travaillent surtout à partir de grosses bases de données pour proposer des « lois » sous forme d'équations mathématiques :

> « You have some hypothesis, you test it on some data, you see if it's true or not, you maybe develop a model or a theory, and then you test it again […] we have so much data about so many different cities, so that you can compare them and see what patterns you get and start doing theory about it »[2170].

C'est plus compliqué avec les géographes français, qui très souvent emploient des MBA. Elise Beck positionne au début du processus les hypothèses provenant de la

[2168] Entretien avec Adeline Rausch, 24.04.15.
[2169] « Une question qui revient souvent c'est : pourquoi on travaille sur un embryon numérique et pas directement sur l'animal ? Pourquoi se compliquer la vie en faisant des coupures et des blessures, en administrant des drogues à l'animal numérique, alors qu'on pourrait faire ça sur l'animal réel ? En fait il y a une chose importante là-dedans, qui est la reproductibilité. Une fois que j'ai mon bon embryon digital, je sais que si je le donne à une équipe au Japon, on va travailler sur le même animal. [Les animaux réels présentent] une distance génétique, ils ne viennent pas du même endroit, ils n'ont pas vécu la même chose, etc. » : entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.
[2170] Entretien avec Luis Bettencourt, 05.03.15.

littérature, d'une « connaissance du monde » ou d'une observation, ensuite c'est le tour de la collecte des données[2171]. Plus que de « reconstruction », terme utilisé par l'équipe de BioEmergences, elle emploie le terme de « traitement » des données[2172], tandis que Pierre Fosset, qui a collaboré avec elle à distance, utilise celui de « préparation »[2173]. L'analyse statistique des données constitue le travail préliminaire à la simulation, mais Beck souligne que le processus est itératif, car l'analyse statistique permet de revenir sur les hypothèses et même sur la collecte des données. Tandis qu'à BioEmergences les différentes phases idéales du triangle épistémologique correspondent à une forte division du travail, chez les géographes la modélisation ne semble pas avoir un moment privilégié pour être commencée : elle se fait en même temps que la formulation des hypothèses et que la collecte, la préparation et l'analyse des données. Le modèle de simulation, qui peut être commencé à tout moment également, ne sera nourri de données qu'à la fin du processus. Comme dans les autres cas d'étude traités dans ce chapitre, la simulation est ensuite calibrée et validée.

Paramétrer et calibrer

Comme le rappelle Edwards, le mot « paramètre » vient du grec « para », au-delà, et « mètre », mesure : il indique une quantité qui n'est pas une variable indépendante, « une sorte de mandataire – un remplaçant de quelque chose qui ne peut pas être modélisé directement mais peut encore être estimé, ou au moins deviné »[2174]. L'historienne et philosophe des sciences Naomi Oreskes et ses collègues la définissent comme « la manipulation des variables indépendantes pour obtenir une correspondance entre la distribution des variables dépendantes observées et celle des variables dépendantes simulées »[2175].

Le paramétrage est souvent utilisé comme synonyme de calibration, et vice versa. Selon Vespignani, il s'agit de deux phases différentes. Le paramétrage se réfère au nombre de paramètres que le chercheur décide d'insérer dans le modèle,

> « c'est un choix en amont, ça dépend des questions auxquelles tu veux répondre et de la nature du système que tu es en train d'étudier. […] Je peux décider que pour comprendre comment on écrit sur le tableau il me faut trente variables et trente paramètres différents ou bien qu'il me faut seulement la couleur de l'encre et le type de feutre, tu vois ? Ceci est un choix »[2176].

[2171] Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.
[2172] *Ibid.*
[2173] Entretien avec Pierre Fosset, 06.07.15.
[2174] Edwards, P., *A Vast Machine*, *op. cit.*, p. 338.
[2175] Oreskes, N. et al., « Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences », *op. cit.*, p. 643.
[2176] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.

La calibration, pour lui, est l'activité consistant à donner une valeur aux paramètres : « dans beaucoup de cas, moi cette valeur je ne la connais pas et donc il faut que je la découvre, que je la déduise »[2177]. Pour d'autres, la calibration peut inclure aussi l'évaluation des règles qui régissent l'ensemble des variables[2178].
L'équipe de Colizza, comme celle de Vespignani, adopte la calibration pour simuler la transmissibilité, c'est-à-dire le paramètre le plus important des simulations des épidémies :

> « *Question* : Combien de paramètres sont arbitraires ?
> *Colizza* : Dans GLEaM, principalement la transmissibilité.
> *Question* : Le plus important.
> *Colizza* : Je ne dirais pas que c'est arbitraire. Chaque maladie a sa transmissibilité.
> *Question* : Et tu dois le trouver…
> *Colizza* : Calibrer, estimer plutôt… Chaque virus a la sienne. Tandis que la durée de l'incubation et de la contagiosité on les découvre empiriquement assez vite. Ça on le prend de la littérature. La transmissibilité dépend du modèle que tu utilises.
> *Question* : Par essai et erreur ?
> *Colizza* : On doit le faire parce que c'est un paramètre inconnu. Un paramètre nécessairement libre »[2179].

Pour Reuillon la calibration « ça va être, minimiser un delta à une forme. Pour moi calibrer c'est quand on s'attend quelque chose »[2180]. D'après Vespignani, il y a ensuite le *tweaking* (ajustement), qui consiste dans la manipulation des paramètres, tels que rajouter ou enlever un élément pour voir comment se comporte le modèle, et le *tuning* (réglage), qui consiste dans l'exploration des effets de l'éventail de valeurs d'un seul paramètre ou d'un ensemble de paramètres[2181].
Mais où se cachent les erreurs dans ces sciences computationnelles ? L'usage de l'ordinateur renvoie à des systèmes automatisés, huilés, fluides, qui fonctionnent sans faute et sans friction. En fait, comme le montre la sous-section suivante, les erreurs se nichent à peu près partout, dans la matérialité de la vie, des objets et des processus computationnels eux-mêmes.

Les sources d'erreurs en biologie

Dans ses moyens de présentation officiels[2182], l'équipe de BioEmergences parle d'un taux d'erreurs quasi nul pour ce qui est de la production de ses résultats, grâce aux technologies innovantes dont elle se dote. L'observation des pratiques et les entretiens

[2177] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2178] Batty, M. & Torrens, P.M., « Modelling complexity », *op. cit.*
[2179] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2180] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
[2181] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2182] Site officiel du laboratoire *BioEmergences* : http://bioemergences.iscpif.fr/bioemergences/index.php.

font émerger une longue série de passages qui sont considérés par les scientifiques comme des sources d'erreur potentiels. Dans cette sous-section, nous décrivons la conception de l'erreur et les pratiques de validation des modèles, selon cette équipe et selon d'autres inscrites dans les SSC.

Le long des phases décrites dans la modélisation-simulation de BioEmergences, les sources d'erreurs sont innombrables et la friction des données remarquable. Celles-ci sont d'abord relatives à la matérialité biologique et microscopique. Avant d'être placé dans la carotte pour l'observation sous le microscope, l'embryon doit subir le « déchorionnement »[2183]. Par le biais d'une petite pince et d'un microscope simple, les biologistes déchirent délicatement l'enveloppe qui le protège. Se produit une pressurisation et, comme le dit la biologiste Adeline Boyreau, « si on tire un tout petit peu trop brusquement, l'embryon est aspiré et complètement écrabouillé »[2184]. Une fois fait, l'embryon doit être aspiré : s'il touche l'air, il meurt. De plus, « il suffit qu'il y ait une petite aspérité dans la carotte pour qu'il soit écorché », ce qui le fait déformer d'abord et exploser ensuite[2185]. Une fois bien installé dans la carotte, l'embryon doit être maintenu à 26-28 degrés Celsius, faute de quoi il ne se développe pas normalement et risque de mourir. Les détecteurs et l'embryon se trouvent dans une petite boîte noire d'où sort un fil vert. Il s'agit d'une sonde pour contrôler que la température soit optimale. « Si dans la nuit pour une raison ou une autre le régulateur tombe en panne, la sonde va tout noter et le lendemain on aura la preuve qu'il y a eu un problème. Ça nous permet de valider notre expérience »[2186]. L'agarose[2187] qui forme le gel de la carotte est conservé dans une boîte : chaque mois il doit être jeté et refait, car la poussière, à force d'ouvrir la boite, se colle à la gélatine. Même la particule la plus fine tachera l'image, en créant de la confusion ou empêchant une vue claire de l'embryon[2188]. À ces problèmes récurrents se rajoutent les problèmes aléatoires : « des fois les poissons vont être un peu plus faibles et vont mourir ; des fois ça peut être un problème technique, un laser qui ne fonctionne plus, une coupure d'électricité »[2189], ou un logiciel qui se plante, comme lors de notre visite de laboratoire. Tenir sous contrôle les différents paramètres, y compris la puissance des lasers qui pourraient tuer l'échantillon, et surveiller le bon développement de l'embryon, ce sont deux opérations fondamentales pour « éviter tous les biais »[2190]. Si un embryon meurt pendant l'imagerie, ou qu'il se développe de façon anormale, l'image n'est pas utilisable :

[2183] Entretien avec Adeline Boyreau, 23.04.15.
[2184] *Ibid.*
[2185] *Ibid.*
[2186] *Ibid.*
[2187] L'agarose est un polymère à base d'agar-agar purifié.
[2188] Entretien avec Adeline Boyreau, 23.04.15.
[2189] Entretien avec Julien Dumont, 23.04.15.
[2190] *Ibid.*

> « Dans la collecte des données, c'est là qu'il faut un biologiste. […] Si tu mets un oursin sous le microscope, à la fin il faut être sûr qu'il s'est développé comme un oursin normal. Si t'as pas ça, peut-être que le traitement que t'as fait sur l'oursin a été nocif, du coup les comportements cellulaires que t'observes sont pathologiques. Donc tu le suis deux ou trois jours après »[2191].

Pour faire face à ces difficultés, les biologistes et les ingénieurs de l'équipe doivent mobiliser leurs connaissances disciplinaires et pratiques personnelles, ou doivent les créer *ex novo* en restant en contact avec le dispositif jusqu'à avoir prise sur lui. De 2006 à 2008, Peyriéras œuvrait elle-même sur les microscopes. « Maintenant, dit-elle, c'est plutôt mes collaborateurs qui font des images. Mais je m'y colle quand il y a des nouvelles modalités, ça a été le cas avec le microscope horizontal. J'y ai mis trois jours et trois nuits pour monter le premier embryon »[2192]. L'ingénieur en microscopie, Julien Dumont, relate avoir été présent lors de l'installation de ce même microscope, mais de ne pas avoir reçu, à la différence de ce qui s'est passé avec les autres microscopes, une véritable formation : « je me suis débrouillé tout seul »[2193]. Si les biologistes du laboratoire appliquent les *connaissances tacites*[2194] qu'ils ont apprises dans leurs stages de maîtrise ou à BioEmergences, l'ingénieur en microscopie est porteur d'une *connaissance tacite* qu'il crée en même temps qu'il utilise et découvre les potentialités de l'appareil. Le problème reste de transmettre ces habiletés aux autres. Comment faire ? Peyriéras répond que ces manipulations il faut les voir et que, à cet égard, il existe des revues scientifiques électroniques qui publient des vidéos : « Cela il faut le voir faire, au moins en vidéo. Vraiment. […] Mais on devrait avoir des films de tout ça. Cela se fait maintenant. Il y a des journaux qui publient des vidéos »[2195].
Le biologiste viennois Andreas Wagner, que nous avons interviewé au SFI lors de l'un de ses courts séjours réguliers, nous explique à cet égard qu'il y a des erreurs intéressantes et des erreurs moins intéressantes :

> « there's interesting and not interesting errors. The not interesting errors is if you have a bug into your computer program or if the PhD student who did a lab experiment just didn't hold a pipette right. This is a matter of […] using technically correct procedures. Doesn't mean that such errors are easy to detect »[2196].

[2191] Entretien avec Paul Villoutreix, 24.04.15.
[2192] Entretien avec Nadine Peyriéras, 23.04.15.
[2193] Entretien avec Julien Dumont, 23.04.15.
[2194] Concept forgé par le philosophe, chimiste et économiste hongrois, Michael Polanyi, il a été rendu célèbre dans les STS par Harry Collins dans son étude sur le TEA laser, où la connaissance tacite est définie comme « notre habileté à accomplir des tâches sans être capables d'exprimer clairement comment nous le faisons. L'exemple standard est l'habileté nécessaire à monter en vélo » : Collins, H., *Changing order*, Chicago, University of Chicago Press, 1992, p. 56.
[2195] Entretien avec Nadine Peyriéras, 23.04.15.
[2196] Entretien avec Andreas Wagner, 07.10.16.

Les erreurs intéressantes se manifestent d'après lui, lorsque les procédures ont été bien exécutées et que le résultat est toujours incohérent par rapport aux attentes : « you're not fully understanding something »[2197]. Cela peut être dû à une hypothèse incorrecte contenue dans le modèle. Ce type d'erreurs sont intéressantes parce qu'elles permettent d'« apprendre quelque chose », à ce point que, malgré que les prédictions de Wagner et de ses collaborateurs sont souvent « affreuses », ils arrivent à publier dans des bons journaux :

> « I call these 'interesting errors' because those are the errors where you have an opportunity to learn, and we make these errors all the time. […] So I'm actually very bad at making predictions. Most of my predictions, especially about experimental work, are just terrible. But we publish our stuff in really good journals nonetheless because we find that what we overlooked gave us a really important insight on what's important »[2198].

La validation à BioEmergences

Quoique les chercheurs et les chercheuses de BioEmergences parlent de taux d'erreur quasi-nul, l'interprétation des données à travers les *cultures épistémiques* spécifiques joue un rôle fondamental dans la reconstruction des images. Cela au moins en deux sens. Le premier est relevé par Varenne : les programmes de reconnaissance des cellules doivent détecter ce trait, et non pas cet autre, en tant que noyau ou paroi d'une cellule, ce qui comporte un tas de prémisses interprétatives[2199]. Le deuxième sens de l'interprétation concerne la *connaissance tacite* des biologistes, qui leur sert pour décider où commence et où termine une cellule. C'est ce savoir-faire, fruit de l'expérience et intransmissible par le biais d'un texte écrit, que les biologistes utilisent, parmi d'autres choses, pour indiquer aux informaticiens comment paramétrer les algorithmes de reconnaissance des formes et pour corriger manuellement d'eux-mêmes les erreurs de détection ou pour détecter les cellules qui ont échappé aux outils informatiques.

Pour BioEmergences, nous l'avons dit, la validation se trouve à la fois dans les statistiques et dans la comparaison entre les données (synthétisées dans l'embryon digitalisé) et la simulation de l'embryon. Comme l'explique Villoutreix :

> « On a les données, à partir des données on fait une représentation d'un certain nombre de paramètres et ces paramètres on les donne en entrée de ce modèle multi-agents : ça va être la durée de vie des cellules, le volume des cellules. Le modèle va considérer comment les cellules se positionnent dans l'espace les unes par rapport aux autres avec un certain nombre de forces mécaniques, et une fois qu'on a ce

[2197] *Ibid.*
[2198] *Ibid.*
[2199] Varenne, F., « La reconstruction phénoménologique par simulation », *op. cit.*

modèle, on fait une simulation et à nouveau on compare celle-ci avec les données par rapport à la caractéristique spatiale. Donc la validité de la simulation on l'estime en faisant une comparaison entre la simulation et les données originales. […] quand il y a pas une correspondance […] bah là il y a une erreur »[2200].

Les erreurs et la validation en géographie quantitative

En géographie, les erreurs peuvent se trouver dans les données, ainsi que dans les hypothèses du modèle, comme dans l'usage des statistiques, comme le témoigne Ignazzi :

> « Si [mon modèle] ne correspond pas [à la réalité que j'ai sous les yeux] signifie soit que les données ne sont pas bonnes, soit que j'ai mal construit le modèle. Je compare les résultats de la simulation aux équations. Parfois tu as des particularités qui s'écartent… Ou alors ça ne me décrit rien de ce qui est l'état présent ou passé de la région, et là peut-être que ce sont les données qui sont incorrectes : la plupart des fois ce sont les données qui sont incorrectes. Environ 20% des fois tu dois admettre que c'est toi qui as fait des erreurs dans les simulations statistiques […] ou bien te t'es trompé dans les hypothèses. Mais celles-là viennent de tes connaissances historiques, et là c'est plus difficile de se tromper »[2201].

L'informatique est un autre terrain où se nichent d'innombrables sources d'erreurs. Paul Chapron, qui collabore avec des géographes, nous rappelle que les informaticiens « compilent » leurs codages : « La compilation permet de transformer le code que l'on a écrit en programme exécutable qui réalise une tâche. […] Et […] on voit si ce que l'on a programmé réalise bien la fonction que l'on voulait que le programme fasse »[2202]. Quand il y a une erreur de codage au niveau de la syntaxe, le programme ne compile pas. Selon Chapron, si un programmeur expert compile « toutes les demi-heures par exemple », un programmeur débutant compile « quasiment tout le temps »[2203]. La validation du « modèle [qui] tourne », à savoir la simulation, est donc multiforme : elle est d'abord syntaxique ou formelle et concerne la cohérence du programme ; elle est ensuite qualitative, car les sorties reproduisent (ou pas) le *pattern* attendu, mais aussi quantitative, car la calibration se fait en comparaison avec les données empiriques.

Quant à la validation, le modèle est promu – jamais de manière définitive – lorsque les *simulats* reproduisent les motifs attendus ou se rapprochent des données empiriques : « Si, comme le dit Fosset, on arrive à expliquer les cas [observés dans la réalité et modélisés numériquement] et que ça reste cohérent, là on pourra considérer notre

[2200] Entretien avec Paul Villoutreix, 10.03.15.
[2201] Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.
[2202] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2203] *Ibid.*

modèle comme validé »[2204]. Or, la validation est considérée par beaucoup de nos interlocuteurs comme « le point faible » de leurs pratiques scientifiques[2205]. En conclusion de cette section nous voudrions donc revenir sur l'usage de ce terme.

Quelques remarques sur le mot « validation »

Comme l'ont dit Naomi Oreskes, Kristin Shrader-Frechette et Kenneth Belitz dans un article épistémologique devenu classique, l'objectif des scientifiques qui utilisent les simulations est d'aller au-delà des solutions analytiques disponibles[2206]. Pour cela, selon les auteurs, les modèles numériques ne peuvent pas être vérifiés ou validés comme peuvent l'être d'autres phénomènes naturels qui sont étudiés par d'autres moyens de recherche. Puisque, selon leurs arguments, des modèles faux peuvent paraître pertinents pour les mauvaises raisons, Oreskes et ses collègues refusent l'emploi du terme « vérification » ou de « validation » pour les sciences numériques et plaident pour des termes plus nuancés[2207]. Ce basculement a généré de nombreux débats à l'époque[2208] et a probablement influencé les pratiques des sciences par la suite. Par exemple les climatologues préfèrent parler précisément d'« évaluation », terme devenu standard dans les rapports du GIEC[2209]. Nous retrouvons, en général, la même prudence chez la plupart de nos interlocuteurs inscrits dans les SSC, quoiqu'ils peuvent parler tout de même de « validation » du modèle, lorsque celui-ci leur semble performant par rapport aux données et cohérent sur le plan interne. Ce qui, sauf des exceptions, n'entraîne pas pour autant une affirmation sûre de leur part à propos de la capacité du modèle de représenter les phénomènes naturels ou d'en saisir le fonctionnement « réel ». C'est le problème de l'équifinalité ou de la sous-détermination des modèles par les observations. Le terme d'« évaluation » nous semble plus rare au sein des communautés inscrites dans les SSC, probablement pour ce que nous en dit Fosset : « Quand on dit 'évaluer' on attribue une note à quelque chose. On évalue un intervalle de confiance, peut-être »[2210]. Reuillon a une épistémologie assumée par rapport à OpenMOLE, plateforme censée justement « évaluer » les modèles et non pas les « valider » : « Parfois je dis valider mais je me fais une discipline de dire évaluer. […] Pour pas être trop prétentieux quoi. Puis parce que j'ai l'idée qu'on fait de la science poppérienne, que du coup tu valides jamais un modèle »[2211].

[2204] Entretien avec Pierre Fosset, 06.07.15.
[2205] *Ibid.*
[2206] Oreskes, N. et al., « Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences », *op. cit.*
[2207] *Ibid.*, p. 641.
[2208] Guillemot H., « Connections between climate simulations and observation », *op. cit.*, p. 246.
[2209] *Ibid.*
[2210] Entretien avec Pierre Fosset, 06.07.15.
[2211] Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.

La *culture épistémique* des statisticiens est encore plus prudente, comme un chercheur de Los Alamos le remarque, lorsqu'il préfère parler de résultats plus ou moins « défendables » :

> « you have this black box [the model] which spits out representations of reality and then you need to validate that. […] So you want to find these inputs that will spit out a curve that best matches that […] So what you really wish is you had truth but you don't. […] Statisticians also really hate talking about right or wrong. When it comes to ding stuff like this, we much prefer to talk about defensible, more defensible or less defensible choices because there is no way you can escape from making choices »[2212].

Nous relevons donc en général une certaine vigilance épistémique : il est rarement question de « correspondance » entre simulation et réalité, ce qui ferait penser à une *adequatio rei intellecti*[2213] aristotélicienne. C'est en revanche souvent une question d'*agreement*, à savoir d'accord, de concordance, un terme qui implique une similitude de forme et de quantité, mais pas nécessairement de substance. Dans tous les cas, la raison que la plupart de nos interviewés donnent pour justifier cette prudence est de nature épistémologique : le trop grand nombre de paramètres libres. Ce qui n'est pas une limite uniquement computationnelle, à terme peut-être surmontable, mais cognitive : tenir ensemble beaucoup trop d'hypothèses, les valider une par une et en contrôler la cohérence des interactions résulte un effort intellectuel trop vaste, qui leur fait préférer – on l'a vu – le chemin de la parcimonie. Or, très rarement les scientifiques donnent des raisons plus ou moins ouvertement métaphysiques pour expliquer tout cela. Rares sont leurs réflexions, publiées ou parues spontanément lors de nos entretiens, autour du rapport ontologique entre modèle-simulation d'une part et système ou monde réel de l'autre. Les ontologies toutefois, et c'est la thèse du chapitre suivant, nous paraissent fondamentales pour comprendre la raison pour laquelle les chercheurs et les chercheuses attribuent à leurs simulations des effets performatifs différents.

Conclusion

Les modélisateurs passent la plupart de leur temps sur les données :

> « It's a huge pain. The rule of thumb in the data science world is that you spend like 85 to 90% of your time dealing with just the data. Cleaning the data, putting it into a

[2212] Entretien avec anonyme.
[2213] Adéquation entre l'esprit et la chose elle-même : la définition de vérité selon Aristote.

form that's useful and then the rest of it is running your model. And that's very true especially in the disease world »[2214].

Dans les entretiens nos interlocuteurs se sont concentrés la plupart du temps dans l'illustration des nombreuses problématiques qu'ils rencontrent en travaillant avec les données : il s'agissait d'un comportement spontané lors de nos entretiens, et non un effet de nos questions ! Il est donc surprenant que la littérature épistémologique sur la simulation numérique se soit si rarement intéressée à cette problématique, les données représentent à notre avis son point aveugle principal. Dans les phases de construction et d'usage des modélisations-simulations, les méthodes et les cadres de la *culture épistémique* informatique sont-ils les seuls à être à l'œuvre ? Nous avons vu que non, que la programmation et tout ce qui va avec ne sont ni les seules activités ni forcément les plus importantes. Le terrain des SSC a montré plutôt que la collecte, la construction et reconstruction, le traitement et l'interprétation des données représentent les phases les plus importantes des pratiques des scientifiques computationnels. Ce qui nous a fait conclure que le travail des modélisateurs numériques en général est un travail artisanal, non pas au sens banal d'une procédure par essai et erreur, mais au sens plus manuel du bricolage, du savoir-faire tacite, du montage d'un objet composite pièce par pièce, chacune desquelles est hétérogène par rapport aux autres, tant en termes de source que de nature. Et c'est un travail hybride, où la théorie, la pratique, la technique et la politique se mélangent dans un tout indissoluble.

[2214] Entretien avec anonyme.

De l'épistémologie à l'onto-épistémologie

Introduction

Il est rare de lire des travaux de philosophie des sciences computationnelles qui, abordant la question épistémologique, traitent en même temps la question ontologique, à savoir la vision que les scientifiques ont du monde ou, du moins, de leur objet d'étude. Or, le terrain des sciences de la complexité a montré la pluralité des attitudes, des pratiques et des stratégies discursives que les scientifiques peuvent avoir par rapport aux simulations numériques et à ce qu'elles permettent de dire sur le monde réel. Selon leurs praticiens, les simulations peuvent aider à explorer des questions, à expliquer des phénomènes, à anticiper des scénarios ou à prouver des théories. Ces différentes configurations dépendent de l'agencement particulier, que les chercheurs et les chercheuses disposent, entre conditions de validité de la connaissance et vision de la nature, et elles sont souvent liées à des *cultures épistémiques* spécifiques.
Dans ce chapitre, il n'est pas question de faire un discours sur l'« existence des objets numériques », à l'instar du philosophe coréen Yuk Hui[2215]. Ce n'est pas une nouvelle ontologie que l'on propose ici. La question est plutôt la suivante : en vertu de quoi les praticiens des SSC considèrent leurs simulations comme heuristiques, comme valides, comme des preuves pour défendre des théories ou des prédictions dotées de capacités performatives devant d'autres groupes sociaux ? À partir des réponses des interviewés, on a pu construire cinq positions idéal-typiques à propos de la relation entre simulations et systèmes réels, aussi bien qu'à propos du pouvoir performatif attribué aux simulations par leurs usagers. Le regard épistémologique est ainsi redirigé vers l'interdépendance indissoluble entre niveau épistémique et niveau ontologique.

La question ontologique

Nous proposons la formule d'*onto-épistémologie indigène* pour nommer l'union inextricable entre le volet du *connaître* et le volet de l'*être* tel que tenu par chaque groupe social de notre corpus. Si l'on observe des comportements différents entre scientifiques computationnels, lorsqu'ils travaillent dans leurs laboratoires et dans les *arènes transépistémiques*, c'est bien parce qu'ils possèdent une conception différente à la fois de ce dont est fait le monde et du type de connaissance qu'ils peuvent produire avec l'ordinateur.
La question ontologique intéresse les STS depuis plusieurs années, voire depuis le début. En 2013, dans la revue *Social Studies of Science*, les sociologues Bas van Heur, Loet Leydesdorff et Sally Wyatt se sont interrogés sur un éventuel « tournant

[2215] Hui, Y., *On the Existence of Digital Objects*, Minneapolis & London, University of Minnesota Press, 2016.

ontologique » dans les STS[2216]. À travers un travail à la fois qualitatif et quantitatif, ils en ont conclu que l'on ne peut pas parler d'*un* tournant, mais plutôt de nombreux mouvements incrémentaux, interdépendants et entremêlés. Ils ont avancé en outre que l'emploi du concept d'ontologie a permis à des vieux débats (propres ou précédents aux STS) de se renouveler. Ils ont soutenu enfin que le débat ontologique des STS a influencé d'autres domaines des SHS.

Dans le même numéro, Steve Woolgar et Javier Lezaun ont publié un texte, dont la thèse fondamentale est classique : le cas d'un sac en plastique utilisé de manière inappropriée pour le tri sélectif par une citoyenne anglaise devient, dans leur récit, un exemple de l'entrelacement indissoluble entre le niveau épistémique, le niveau ontologique et le niveau politique[2217]. De même, le philosophe américain Ian Hacking a montré, dans son livre *Historical Ontologies*, non seulement la pluralité des ontologies à l'œuvre (ce que les STS ont établi dès le départ), mais aussi leur historicité, leur évolution dans le temps[2218]. Le philosophe canadien Sergio Sismondo intervient deux ans plus tard toujours dans la revue *Social Studies of Science*, en rappelant que les ontologies ne sont pas des « perspectives » individuelles et contextuelles, mais des visions du monde partagées qui résultent des pratiques matérielles et techniques de différents groupes sociaux[2219]. Ce geste anti-platonicien implique que le nombre des ontologies portées par les groupes sociaux et par les individus n'est pas infini, comme le dit Sismondo lui-même : « a focus on interwoven practices that can be described on the pages of journals like this one means that there will always be at most a handful of ontologies at issue »[2220].

Les cinq *onto-épistémologies* décrites dans ce qui suit sont partagées par un nombre fini de *cultures épistémiques*. Par exemple, une certaine manière de faire preuve et une certaine vision du monde peuvent se retrouver à la fois dans une *culture épistémique* physicienne et dans une *culture épistémique* économique. Ou pour le dire autrement, des scientifiques provenant de cultures différentes peuvent co-construire, participer à, ainsi que diffuser une même *onto-épistémologie*.

À propos de cinq onto-épistémologies

Au début de notre travail de terrain, les entretiens sur la simulation portaient surtout sur les manières dont les spécialistes des systèmes complexes administraient la preuve, ou encore sur les phases du processus qui portent à la construction, à la validation et à

[2216] Van Heur, B., Leydesdorff, L. & Wyatt, S., « Turning to ontology in STS ? Turning to STS through 'ontology' », *Social Studies of Science*, 2013, vol. 43, n. 3, pp. 341-362.
[2217] Woolgar, S. & Lezaun, J., « The wrong bin bag : A turn to ontology in science and technology studies ? », *Social Studies of Science*, 2013, vol. 43, n. 3, pp. 321-340.
[2218] Hacking, I., *Historical Ontology*, Cambridge, Londres, Harvard University Press, 2002.
[2219] Sismondo, S., « Ontological turns, turnoffs and roundabouts », *Social Studies of Science*, 2015, vol. 45, n. 3, pp. 441-448.
[2220] *Ibid.*

l'usage du modèle-simulation. La question des ontologies est venue plus tard, quand il est apparu que la question sur les *épistémologies spontanées* et sur les pratiques des chercheurs et des chercheuses était insuffisante pour saisir la raison profonde qui rend les simulations crédibles aux yeux des scientifiques computationnels et d'autres groupes sociaux. Jusque-là, les interviewés faisaient référence à des postulats ontologiques différents souvent de manière implicite, ce qui les rendaient difficilement détectables. Nous avions ainsi l'impression que cette référence ontologique n'avait qu'une couleur : on la qualifiait d'emblée et en général de « métaphysique computationnelle ». Puis graduellement nous avons commencé à faire des distinguos dans les différentes métaphysiques invoquées. Il est devenu possible de remarquer des régularités lorsqu'on a découvert les positions, très rares, placées aux extrémités d'une sorte de continuum dont le centre « gaussien » est bien plus charnu : d'une part les scientifiques qui mettaient à distance cette métaphysique computationnelle, par ailleurs hégémonique dans l'ensemble des SSC, et d'autre part les quelques scientifiques qui poussaient la métaphysique computationnelle jusqu'aux extrêmes, en en tirant une cosmologie et une cosmogonie inédites. Nous avons alors commencé à utiliser, dans le contexte de nos entretiens, l'outil ancien mais toujours opérationnel de la distinction aristotélicienne en quatre *causes* : matérielle, formelle, finale et efficiente. Au début, ce n'était pour nous qu'une métaphore utile pour permettre aux interviewés d'expliciter leurs positions métaphysiques, même si tous les scientifiques ne connaissaient pas la distinction d'Aristote. On a pu ainsi construire les cinq typologies onto-épistémologiques, qu'on se propose de restituer de manière ordonnée dans ce qui suit, en utilisant Aristote cette fois de manière analytique pour éclaircir les visions des scientifiques des systèmes complexes.

Le tableau idéal-typique inclut donc cinq catégories : des *dualistes*, des *agnostiques*, des *structuralistes*, des *vitalistes* et des *monistes*. Une même personne peut passer d'un idéaltype à un autre dans le cours de sa carrière ou selon l'évolution de ses pratiques de recherche. Même si d'importantes régularités transversales existent en leur sein, les SSC sont plurielles et ne forment pas une unité. Sous la seule et même catégorie de « métaphysique computationnelle » on trouve trois idéaux-types différents. On a vu qu'il y avait plusieurs *cultures épistémiques* différentes en jeu : les statisticiens, les mathématiciens, les informaticiens, les géographes, les physiciens, les économistes, etc. revendiquent souvent leurs cultures propres tout en s'efforçant de dépasser les « limites disciplinaires » pour apprendre d'autres cultures. Nous avons ainsi rencontré des chercheurs et des chercheuses capables de maîtriser les pratiques, les langages, les postulats onto-épistémologiques indigènes d'autres cultures scientifiques, en faisant toutefois un choix entre les différentes onto-épistémologies : soit il s'agit d'un(e) géographe qui contacte des informaticiens puisqu'il ou elle s'intéresse déjà à la logique mathématico-quantitative de manière autonome, soit il s'agit d'un(e) physicien(ne) devenu(e) sociologue qui décide de respecter les onto-épistémologies

typiques de la sociologie – bref, toutes ces combinaisons et leurs contraires sont observables, mais chaque combinaison repose sur un choix et sur au moins une exclusion.

En utilisant une métaphore issue du domaine artistique, celle du dessin, on peut définir le couple formé par la main et le stylo comme la *cause efficiente*, le papier et l'encre comme la *cause matérielle*, la forme du dessin comme la *cause formelle*, tandis que l'aspect perceptuel et sémantique du dessin comme la *cause finale*. Si on oublie la *cause efficiente* et *finale*, qui ne sont pas très pertinentes pour ce qui nous intéresse, restent la *cause formelle* et la *cause matérielle*. Or, si l'on imagine un schéma avec deux colonnes parallèles, on aurait d'une part le monde réel et d'autre part la simulation numérique ; chaque colonne, ensuite, serait divisible à moitié, la première correspondant à la *cause matérielle* et la deuxième à la *cause formelle*. On a ainsi :

- les *dualistes* qui voient les deux colonnes comme entièrement détachées et ne partageant rien : monde réel et simulation s'écartent à la fois en ce qui concerne leur *cause matérielle* et en ce qui concerne leur *cause formelle* – les *cultures épistémiques* en présence proviennent surtout des sciences de la vie et des SHS ; on peut trouver aussi des informaticiens, des ingénieurs, des mathématiciens et des physiciens, mais ils sont plus rares ;
- les *agnostiques* qui suspendent leur jugement ontologique sur la séparation entre les deux mondes, même s'ils oscillent souvent entre la position des dualistes et celle des structuralistes, et se limitent à constater que les simulations peuvent parfois « marcher » – les seules *cultures épistémiques* repérées sont d'origine statisticienne et informaticienne ;
- les *structuralistes* qui affirment que leurs simulations marchent parce qu'elles captent les règles formelles du fonctionnement des systèmes réels, tout en jugeant que la cause matérielle est bien différente dans les deux cas – les *cultures épistémiques* en présence sont surtout celles des physiciens et des informaticiens ;
- les *vitalistes* qui, comme les *structuralistes*, pensent qu'il existe une homologie entre les causes formelles à l'œuvre dans les systèmes réels et les causes formelles à l'œuvre dans leurs simulations ; cependant, ils se distinguent des *structuralistes* par le fait de considérer les simulations comme réellement « vivantes » – cet idéaltype est rarement habité par des *cultures épistémiques* autres que celle de l'informatique ou des mathématiques ;
- les *monistes* qui, s'opposant aux dualistes, et se trouvant donc à l'autre extrémité du continuum onto-épistémologique, ne voient pas de différences entre les deux colonnes, la *cause matérielle* étant toujours subordonnée à, et contenue dans la *cause formelle* – cette catégorie est représentée, dans notre corpus d'entretiens, par trois seuls exemples, qui ont en commun une forte culture informaticienne, physique et mathématique.

Plusieurs éléments sont à prendre en compte pour examiner ces *onto-épistémologies*. La description de chaque idéaltype commence par ce que les simulations numériques peuvent avoir comme effets pratiques, selon les scientifiques qui les utilisent. Ensuite, nous citons, si on en a trouvés, des extraits d'ouvrages en philosophie des sciences qui exemplifient les idéaux-types onto-épistémologiques. Enfin, des extraits d'entretiens illustrent et caractérisent les différents idéaux-types.

Dualistes

Pour les dualistes, la simulation numérique peut suggérer des pistes de recherche, indiquer des questions à poser ou à écarter, bref elle peut être une aide à la recherche. La simulation, dans ce cadre onto-épistémologique, est purement « heuristique », c'est-à-dire qu'elle ne « prouve » rien. L'anthropologue Jeremy Sabloff, ancien président du SFI, soutient précisément cette vision : « I think [simulations a]re used in most of the cases, certainly in social sciences that I'm aware of, […] to show the likelihood. And so they don't prove something but they show that a more abstract hypothesis is at least feasible on the ground »[2221]. La raison métaphysique de cette position réside dans la vision d'un univers physique et biologique séparé de celui des idées et des simulations. Ce décalage métaphysique – qui décrit la sphère du langage comme étant sur un rail parallèle et séparé du rail sur lequel court le monde réel – est ce qui justifie la position épistémologique et pratique des scientifiques s'inscrivant dans cet idéaltype. Puisque selon les *dualistes* les deux mondes ne se touchent pas, ni partagent quoi que ce soit, l'un ne peut pas « vraiment » dire quelque chose de « vrai » à propos de l'autre. Dans ce sens, le « laboratoire synthétique » n'est qu'un monde des idées factice, où l'on ne peut que tester des hypothèses par jeu, hypothèses qu'il faudra toujours aller confronter, si possible, avec des expériences *in vivo* ou *in materia*.

Dans cette catégorie se trouvent ces philosophes qui, selon le témoignage d'Eric Winsberg, considèrent l'aspect expérimental des simulations comme simplement « métaphorique »[2222]. Il n'y a pas d'ouvrages, dit-il, qui soutiennent ouvertement cette position, mais c'est d'après lui une position qui revient dans les discussions informelles avec les collègues. En réalité, nous considérons que Mary Morgan également trouve sa collocation dans cette catégorie, lorsqu'elle affirme que les économistes disent quelque chose du système économique réel à partir des expériences formelles et narratives qu'ils opèrent sur leurs modèles :

> « by experimenting with the model, economists can gain understanding and provide explanations of *how the economic world in the model works* and use these in an

[2221] Entretien avec Jeremy Sabloff, 23.09.16.

[2222] « I should point out that I know of no published references that themselves argue for exactly the view that simulation is just a fancy word for using brute-force computational means to solve analytically intractable equations. It is, however, a not-uncommon opinion expressed in conversation » Winsberg, E., « Simulated Experiments », *op. cit.*, p. 110.

informal way to *reflect on the workings of the real economy* that the model is taken to represent »[2223].

La philosophe britannique sépare nettement le monde du modèle du monde que le modèle représente ; elle tisse une liaison déductive entre les deux, qui n'implique pas une homologie ni une identité entre le modèle et le monde réel. Quand la philosophe anglaise parle des modèles comme des « actes de création », d'intuition, de visualisation et de formalisation, elle décrit une ontologie de l'esprit comme étant clairement autonome et parallèle à l'ontologie des systèmes économiques réels[2224]. Ainsi, dans sa pensée, le modèle économique pourra raconter des histoires « plausibles » sur le monde réel, en suggérant des intuitions sur comment les événements se passent dans la réalité[2225]. Elle ne laisse pas de doutes, lorsqu'elle dit que le monde du modèle est un monde « parallèle » : « The model world is at most a parallel world. […] economic models are only *representations of* things in the economy, not the things themselves »[2226]. Dans les expériences biologiques de laboratoire, selon Morgan le saut déductif entre l'animal-modèle d'une part et l'animal-réel de l'autre est moindre, du fait de leur « ontologie partagée », tandis que dans le cas des modèles économiques le décalage déductif résulte plus difficile à combler[2227].
L'idéaltype des dualistes convient aussi à Oreskes et collègues, comme le montre l'abstract de leur fameux article sur l'impossibilité de vérifier ou valider les modèles numériques :

« Verification and validation of numerical models of natural systems is impossible. This is because natural systems are never closed and because model results are always nonunique. Models can be confirmed by the demonstration of agreement between observation and prediction, but confirmation is inherently partial. Complete confirmation is logically precluded by the fallacy of affirming the consequent and by incomplete access to natural phenomena. Models can only be evaluated in relative terms, and their predictive value is always open to question. The primary value of models is heuristic »[2228].

Le philosophe Franck Varenne nous semble également dualiste lorsqu'il partage la définition que Marvin Minsky donne du modèle, définition que Varenne qualifie de pragmatique et non-représentationnelle :

[2223] Morgan, M.S., *The world in the model*, *op. cit.*, pp. 36-37.
[2224] *Ibid.*, p. 95.
[2225] *Ibid.*, p. 247.
[2226] *Ibid.*, pp. 286-287.
[2227] *Ibid.*, p. 287.
[2228] Oreskes, N. et al., « Verification, validation, and confirmation of numerical models in the Earth sciences », *op. cit.*

> « According to a characterization due to Minsky, 'To an observer B, an object A* is a model of an object A to the extent that B can use A* to answer questions that interest him about A'. This minimal characterization is interesting because it adopts a pragmatic approach. In particular, it does not make use of the notion of representation. So, it lets open the question whether a useful model is a true or approximate representation of the target system »[2229].

Le sociologue Sven Opitz porte également une onto-épistémologie dualiste, lorsqu'il dit : « It is more appropriate to understand [digital simulations] as non-representational devices in the sense that they do not aim to reproduce or imitate an outer reality »[2230]. Le philosophe Giuseppe Longo est dualiste également lorsqu'il distingue entre « modèle », terme qui désigne des théories locales qui sont validées directement par l'expérience, et « schème », terme qui désigne des théories locales non-validées par l'expérience :

> « Il nous reste la notion de *schème* […] en tant que cadre d'intelligibilité qui n'a pas nécessairement de contrepartie « naturelle » : il n'a donc pas nécessairement d'interprétation physique, voire biologique. […] Par rapport au modèle, un schème est à l'opposé de l'imitation : si on arrive à tromper un observateur et lui faire croire qu'une machine est une femme, on n'a pas nécessairement beaucoup ajouté à la connaissance des femmes […] Notre schème a pour seul but l'intelligibilité, il propose un espace mathématique pour comprendre, même s'il n'a pas d'interprétation matérielle »[2231].

Quid des scientifiques ? Certainement, la catégorie des dualistes inclut tous ceux et celles qui produisent des *toy models* sans avoir l'objectif de « prouver » quelque chose à propos du système réel en étude. Par contre les modèles-jouet peuvent, selon ces scientifiques, suggérer des hypothèses à propos des comportements ou des fonctionnements du système réel. Toutefois, il serait une erreur de confondre tous ceux et celles qui utilisent des *toy models* avec des *dualistes*. Il existe par exemple des *structuralistes* qui utilisent des modèles simplifiés, dans l'attente de pouvoir construire des modèles « réalistes » à partir de données empiriques.
L'ingénieur chimique Ali Cinar, du Center for Complex Systems and Dynamics, rattaché à l'Illinois Institute of Technology de Chicago, explique qu'il ne pourrait pas

[2229] Varenne, F., « Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity », *op. cit.*, p. 11.
[2230] Opitz, S., « Simulating the world : The digital enactment of pandemics as a mode of global self-observation », *European Journal of Social Theory*, 2017, vol. 20, n. 3, p. 396.
[2231] Longo, G., « Des sciences exactes aux phénomènes du vivant, à partir de Schrödinger : mathématiques, programme et modèles », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, p. 109.

obtenir l'aval de ses collaborateurs biochimistes s'il ne les rassurait pas sur le fait que les simulations ne sont que des suggestions quant aux « régions d'intérêt » de la recherche en cours ou future, où le dernier mot reste aux expériences :

> « The only way I could convince others to collaborate with me is when I tell them that I respect the real experiments being the final judge. And the models that we are building to do simulations are just to give them an opportunity to observe things approximately to figure out what are the regions of interest to study experimentally. So simulations will never replace experiments »[2232].

Cinar ajoute que la position se défend par un argument empirique important : certaines expériences qui ont « marché bien » dans la simulation sont « tombées en miettes » une fois réalisées dans la « vie réelle » : « if the simulation was as good as reality, many things that have been simulated and worked fine but fell apart when tried in real life, wouldn't have happened »[2233]. Pour lui la simulation n'est pas une « preuve » de quoi que ce soit, pourtant elle peut résulter heuristique aux yeux des autres scientifiques avec qui Cinar collabore :

> « I collaborate with people who do experiments. I just try conditions in simulation to show how blood vessels are being formed and, based on those results, they sometimes say, 'We didn't think that that could have been something of interest' and they start thinking about it »[2234].

Une mathématicienne et épidémiologiste computationnelle du LANL ne considère pas les simulations comme des « expériences », précisément parce qu'elles ne prouveraient rien sur les systèmes réels[2235]. L'argument est épistémique et pratique à la fois : l'ordinateur ne fait rien d'autre que ce que le codeur lui dit de faire. Avec les expériences réelles, d'après cette chercheuse, l'incertitude quant aux issues est totale parce que nous ne connaissons pas le mode de fonctionnement du système, car c'est justement la chose à découvrir. En revanche, la simulation peut d'après elle toujours produire des surprises, mais c'est à partir de règles que le programmeur a conçues et insérées dans le modèle-simulation lui-même. Dans cette optique, l'ordinateur permet donc de faire des « suppositions » sur le fonctionnement des systèmes, qui doivent être en tout cas étudiés empiriquement, par expérience classique ou par observation. Et si les résultats du *simulat* ne correspondent pas aux données empiriques, cela veut dire, selon la mathématicienne du LANL, que les suppositions sont fausses ou qu'il y a un autre mécanisme à l'œuvre dans le système réel : « it's really hard to tell if you are

[2232] Entretien avec Fouad Teymour et Ali Cinar, 16.09.16.
[2233] *Ibid.*
[2234] *Ibid.*
[2235] Entretien avec anonyme.

capturing the true dynamics »[2236]. Le modèle peut fonctionner de manière aléatoire, ou pour des raisons différentes de celles supposées par le modélisateur, ou alors il pourrait fonctionner dans un cas spécifique, sans être transposable à des cas similaires. De manière cohérente à cette *onto-épistémologie* et à ces arguments, la chercheuse en question travaille à contact étroit avec des expérimentalistes dans un aller-retour entre les modèles-simulations qu'elle produit et les résultats sur l'infectivité testée sur des vrais animaux.

Mathématicienne très proche des biologistes, elle n'est pas la seule à faire attention aux pouvoirs performatifs qu'elle attribue à la simulation par ordinateur. Le biologiste Andreas Wagner sanctionne ses collaborateurs informaticiens lorsqu'ils appellent « expériences » leurs simulats, et ce pour les préparer à respecter la *culture épistémique* biologiste lorsqu'ils se trouveront à des conférences de biologie :

> « I have a bunch of computer scientists in my group […] [At] one of our group meetings [somebody said] something like, 'Last week I did this experiment'. And the first thing I told him is, 'Never call something you did on a computer an experiment'. An experiment is something you do in the lab or in the field or in the real world. […] the reason I say this is because I want them to have the distinction between whatever they do in a computer and what you do in the lab or in the field. Because if you go talk to biology audiences and say, 'This is an experiment', they'll just laugh you out of the room »[2237].

Selon le bioinformaticien Guillaume Beslon, les simulations par réseaux ou par MBA « aide[nt] à penser » et ce « pour progresser dans [l]a réflexion »[2238]. Dans un chapitre d'un livre collectif que Beslon a coécrit avec le biochimiste Hugues Berry, il a soutenu qu'elles ne constituent en aucun cas une preuve :

> « 'Un modèle individu-centré peut-il constituer une preuve scientifique ?' Selon nous, il faut impérativement se garder de simplifier ainsi la question sous peine d'y apporter une réponse négative et, partant, de rejeter en bloc l'outil au nom de son incapacité à prouver. Il nous semble en effet évident – et à de multiples titres – qu'un modèle individu-centré ne constituera jamais une preuve scientifique. En premier lieu, bien sûr, il s'agit d'un modèle et à ce titre d'une description approximative, nécessairement fausse, de la réalité »[2239].

[2236] Entretien avec anonyme.
[2237] Entretien avec Andreas Wagner, 07.10.16.
[2238] Beslon, dans l'entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
[2239] Berry, H. & Beslon, G., « De la modélisation comme poésie. La modélisation de systèmes biologiques complexes vue par deux modélisateurs », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, p. 356.

S'ils ne forment pas une preuve, sont-ils inutiles ? Les auteurs répondent par la négative : « À ce titre, ils peuvent *surprendre* leur concepteur et lui poser des questions… auxquelles celui-ci peut répondre scientifiquement »[2240]. L'utilité des simulations par agents réside dans le fait de pouvoir explorer avec elles le champ de possibles, d'aider à penser des nouvelles hypothèses, de nouvelles questions : « les modèles individu-centrés peuvent permettre de 'préparer l'intuition' des biologistes en explorant *in virtuo* ces échelles inaccessibles »[2241]. Dans cette *onto-épistémologie*, l'épistémologie dominante n'est pas uniquement ou principalement issue de l'informatique, au contraire celle-ci doit se plier à celle de la discipline dont elle se met au service : « parler d'une épistémologie *des* modèles individu-centrés n'a probablement pas de sens : chaque champ d'application va en effet apporter avec lui sa propre épistémologie à laquelle le modèle sera prié de se plier »[2242].
Le géographe-modélisateur Arnaud Banos pense que la simulation numérique est une expérience d'un autre type, tout aussi heuristique que les autres manières de faire science. Les modèles-simulations sont ainsi vus comme des falsifications d'hypothèses à utiliser une fois et à jeter aussitôt :

> « Je vois [la simulation] plutôt comme une heuristique, voire même dans certains cas comme une maïeutique, l'idée de t'aider à accoucher tes idées. Et qu'ensuite ce truc-là […] doit partir parce que ça t'a aidé à comprendre certaines choses et à passer à un niveau supérieur. Après, tu n'en as plus besoin, tu t'en sers plus. Pour moi, il ne doit pas y avoir de réification du modèle, tu vois ? Le modèle, c'est simplement une étape intermédiaire vers autre chose. Et je crois beaucoup au modèle 'Kleenex' : une fois que tu l'as fait, tu vois, tu le jettes »[2243].

Et tout comme Beslon, Banos subordonne l'épistémologie informaticienne à celle de sa propre discipline :

> « La collaboration avec des informaticiens est plus que jamais de rigueur dans ce domaine à l'évolution très rapide. L'un des enjeux, à mon sens, est alors de ne pas se laisser guider par la technologie mais par des principes bien définis. Cette responsabilité incombe au géographe. À lui de garder le cap ! »[2244].

La position des dualistes caractérise non seulement des *cultures épistémiques* en particulier – sciences de la vie et SHS notamment ; elle peut caractériser aussi les nouveaux entrants dans le domaine des sciences computationnelles, dont les pratiques

[2240] Berry, H. & Beslon, G., « De la modélisation comme poésie », *op. cit.*, p. 358.
[2241] *Ibid.*, p. 364.
[2242] *Ibid.*, p. 361.
[2243] Entretien avec Arnaud Banos, 25.04.17.
[2244] Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre*, *op. cit.*, p. 31.

et les ontologies hégémoniques peuvent finir par s'imposer à leurs yeux avec le temps. Par exemple, la bioinformaticienne Melanie Moses, rattachée au SFI, relate avoir eu, au début de sa pratique modélisatrice, les caractéristiques de l'idéaltype *dualiste* : « I think I first started thinking of simulation as hypothesis generator in the biomedical context where there are so many things you can't observe. […] it's a simulation that gives you hints about where to look »[2245]. Plus tard elle assumera une position *structuraliste*.

Agnostiques

Dans notre corpus, les *agnostiques* sont rares. Ils emploient un argument pragmatique, qui est d'ailleurs partagé par tous les membres des autres idéaux-types, et qui consiste à dire simplement : les simulations, parfois, « ça marche ». L'*agnostique* incarne une position *sceptique* sur la question onto-épistémologique de la liaison entre le monde de la simulation et le monde du système réel. Puisque le questionnement métaphysico-épistémique est mis entre parenthèses par les *agnostiques* avec une véritable épochè, il ne leur reste que profiter des performances des simulations numériques, même si elles demeurent philosophiquement inexplicables.

Un statisticien du LANL juge les résultats statistiques comme plus ou moins « défendables »[2246]. De manière analogue, l'un de ses collègues informaticiens pense que la question de la « véridicité » des modèles n'a tout simplement pas de sens[2247]. Certes, il est conscient des codes sociaux pour « valider » un modèle devant la communauté scientifique : « Basically the way you judge disease models is whether their assumptions seem reasonable, that's one, and then two, do they fit the data »[2248]. Toutefois, pour lui, ce qui est intéressant c'est de voir si le modèle permet au modélisateur d'apprendre quelque chose : « is error sufficiently small that you can still learn something from the model ? »[2249]. Ce chercheur se pose donc une question pratique et théorique : « So if you have a specific outbreak, can you reproduce that outbreak in your simulation ? »[2250]. Si la modélisation reproduit le motif attendu, cela permet de continuer à réfléchir sur les hypothèses, sans se préoccuper de se demander s'il y a une *adequatio rei intellecti* entre théorie et monde réel :

> « *Question :* It's then a pragmatic approach : 'does it work or not ?'.
> *Anonymous :* Right, exactly. So whether the model is true… I don't know if that question is even meaningful »[2251].

[2245] Entretien avec Melanie Moses, 21.09.16.
[2246] Entretien avec anonyme.
[2247] *Ibid.*
[2248] *Ibid.*
[2249] *Ibid.*
[2250] *Ibid.*
[2251] *Ibid.*

Cette position onto-épistémologique n'est pas très représentée dans notre corpus. Ce qui abonde ce sont en revanche des arguments pragmatiques en appui aux autres positions onto-épistémologiques, mais ces arguments sont toujours un élément supplémentaire pour justifier les jugements épistémiques des scientifiques à propos de leurs *simulats*. Ces arguments, quand ils sont utilisés par les représentants des autres idéaux-types, ne sont jamais le seul élément de leurs discours. Également, pour des raisons facilement déductibles, la position *agnostique* est assez rare dans le monde philosophique. Si toute discussion onto-épistémologique sur la véridicité des modèles est évacuée avec une formule laconique comme « ça marche, même si je ne sais pas pourquoi », il est évident que toute argumentation à cet égard devient vite superflue. En outre, depuis les sceptiques et les cyniques grecs, et surtout depuis la formule finale du *Tractatus* de Wittgenstein, on sait que la suspension du jugement peut entraîner le silence.

Structuralistes

L'idéaltype le plus représenté dans notre corpus d'entretiens est celui des *structuralistes*. Pour eux, le monde de la simulation et le monde du système réel ne partagent pas la même matérialité ; ils partagent par contre une même structure, une même forme, une même logique de fonctionnement. Schématiquement, la *cause matérielle* n'est pas commune aux deux colonnes, mais la *cause formelle* est la même, ou du moins celle du modèle reflète celle du système réel étudié. Autrement dit, il s'agit d'une homologie ou d'une identité, selon les nuances individuelles des chercheurs et des chercheuses rencontrés. Pour eux, il n'est plus question de voir la simulation comme une aide à la recherche, comme elle l'était pour les *dualistes* : pour les *structuralistes*, les simulations peuvent faire preuve.

De par son importance statistique, cette catégorie présente en son sein une variété de nuances considérable. Toutefois, le souhait de la plupart des *structuralistes* est le même, et il est plus ambitieux que celui des *dualistes* : dans leur vision, les modèles-simulations ne sont pas seulement heuristiques ; ils permettent plutôt d'améliorer les capacités de compréhension et de prédiction des systèmes réels. Certes, les *structuralistes* font confiance à leurs simulations parce qu'elles « marchent », mais ils disent aussi savoir pourquoi : c'est lié au fait que les règles inscrites dans le code du programme « capturent », « saisissent » les lois, les structures, les modes de fonctionnement des systèmes réels.

Selon Varenne, dans un article consacré à l'« épaisseur du simulat »,

> « [e]n simulation de l'émergence dans les systèmes sociaux, on voit ainsi paraître beaucoup d'articles qui montrent qu'un effet d'émergence propre à un phénomène social peut être simulé par une reconstruction phénoménologique traitée là aussi de manière computationnelle. Mais peu d'articles se posent ensuite la question de

savoir si cette émergence est accidentelle et due uniquement à la notation discrète choisie ou si elle rend compte vraiment de manière approchée de la façon dont le mécanisme d'émergence opère effectivement dans le système réel. Et là, les techniques de validation achoppent »[2252].

Les scientifiques *structuralistes* – qu'ils soient physiciens, biologistes, épidémiologistes ou géographes – affirment en fait pouvoir saisir le réel par le digital, en exploitant la possibilité métaphysique de cette homologie, de cette homomorphie entre les deux mondes. Mais avant de parler des scientifiques, il est encore une fois utile d'examiner ce que disent les philosophes, qui illustrent, soit de façon autonome soit sous la forme d'une exégèse des modélisateurs, les positions de ces derniers avec des termes explicites. De manière similaire à ce qui se passe chez les scientifiques, où les *structuralistes* abondent, les philosophes qui défendent ce type d'*onto-épistémologie* sont les plus nombreux également.
Le physicien et philosophe des sciences allemand, Martin Warnke, souligne le fait que l'aspect intéressant des MBA est qu'il s'agit de modèles dépourvus de théories mathématiques sous-jacentes, parce que plutôt basés sur des règles. Le fait étonnant, pour lui, c'est qu'en science, on n'avait jamais pensé en termes de règles, mais toujours en termes de lois et d'équations : dans les MBA, à son avis, la théorie est la simulation elle-même[2253]. Warnke se limite à souligner le fonctionnement des MBA sur la base de règles codées, tandis d'autres philosophes n'hésitent pas à tisser un lien de connexion entre les règles du programme et les règles qui régissent le comportement des systèmes réels. Sismondo est, comme Warnke, plus dans la description que dans la prescription quand il emploie le terme d'« analogie », au lieu de celui d'homologie ou de mimétisme, pour décrire le même phénomène. D'après lui, en outre, les théories représenteraient aux yeux des scientifiques l'ensemble des modèles des structures que l'on pense être sous-jacentes à l'objet étudié :

« The material uses of the word 'model' suggest that even mathematical models should be analogues of physical systems, and as analogues they are tools for understanding, describing, and exploring those systems. They should *behave* in the same way as the things they represent behave. Models are therefore different from theories not only in being applied, but in being analogues. Theories are now typically thought not to represent particular physical systems or even classes of physical systems, but underlying structures or necessities »[2254].

[2252] Varenne, F., « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », dans Parrocchia, D. et Tirloni, V., *Formes, systèmes et milieux techniques*, Lyon, Jacques André, 2012, p. 19.
[2253] Martin Warnke, commentaire personnel du 24.06.16.
[2254] Sismondo, S., « Models, Simulations, and Their Objects », *op. cit.*, p. 249.

Selon Sismondo, les simulations sont pour les scientifiques des copies virtuelles des systèmes et ont une correspondance un-à-un avec les systèmes qu'elles représentent :

> « Computer simulations are similarly analogues, virtual copies of systems. Because of the problems that computers are seen to solve efficiently, simulations are usually more obvious analogues than are models. […] Simple one-to-one correspondences between virtual objects and real ones (however idealized and simplified they might be) can be easily drawn »[2255].

D'autres philosophes donnent l'impression de confondre la fonction descriptive de leurs analyses avec la fonction normative de leurs travaux. C'est le cas de ceux qui nomment la correspondance formelle entre objet et simulation la « qualité mimétique » des simulations[2256], le modèle numérique étant dans cette optique une imitation du système réel. C'est aussi le cas de Peter Galison, qui a qualifié une tradition de la physique d'« homomorphique »[2257].
D'autres chercheurs en SHS prennent plus nettement position. Stephen Norton et Frederick Suppe assimilent la simulation aux expériences, puisque les algorithmes miment, selon eux, les systèmes physiques réels[2258]. Corinna Elsenbroich, à travers un raisonnement complexe, défend l'idée selon laquelle les MBA peuvent décrire les fonctionnements du système réel, tant de la matière condensée que d'une société humaine[2259]. Eric Winsberg défend la dignité épistémique des simulations numériques, car ce qui les différencie des expériences n'est pas, selon lui, la nature de l'outil de recherche, mais la quantité de connaissance acquise qu'il faut mobiliser pour les comprendre[2260]. Isabelle Peschard affirme que « [l]'information que l'activité expérimentale a pour but de produire au sujet du système cible est la forme structurelle, c'est-à-dire les relations entre quantités physiques, que le comportement du système instancie »[2261]. Paul Humphreys défend une vision mimétique de la simulation :

> « 'System S provides a core simulation of an object or process B just in case S is a concrete computational device that produces, via a temporal process, solutions to a computational model […] that correctly represents B […] If in addition the

[2255] *Ibid.*, p. 250.
[2256] Par exemple, Winsberg, E., « Simulated Experiments », *op. cit.*, p. 113.
[2257] Galison, P., *Image and Logic*, *op. cit.*, p. 19.
[2258] Norton, S. & Suppe, F., « Why Atmospheric Modeling is Good Science », dans Miller, C. & Edwards, P. (ed.), *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge, MIT Press, 2000.
[2259] Elsenbroich, C., « Explanation in Agent-Based Modelling : Functions, Causality or Mechanisms ? », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2011, vol. 15, n. 3.
[2260] Winsberg, E., « A Tale of Two Methods », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 575-592.
[2261] Peschard, I., « Les simulations sont-elles de réels substituts de l'expérience ? », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, p. 161.

computational model used by S correctly represents the structure of the real system R, then S provides a core simulation of system R with respect to B »[2262].

Pour en venir aux scientifiques, nombre de nos interlocuteurs invoquent la similitude entre la forme des *simulats* et la forme des analyses statistiques des données empiriques ; comme le dit la géographe Clémentine Cottineau : « ça ne suffit pas d'avoir un modèle qui reproduit quelque chose. Il faut quand même que les mécanismes au fondement du modèle correspondent aussi avec des processus observés »[2263]. Mais l'homologie, l'homomorphie, le mimétisme vont bien au-delà de la simple correspondance graphique entre le graphe des données réelles et le graphe issu de la simulation. La correspondance est métaphysique, c'est-à-dire que les *structuralistes* attribuent une même forme au fonctionnement du système réel et au fonctionnement du système simulé.
Laetitia Gauvin est une physicienne statisticienne française, qui a un poste stable à l'ISI de Turin. Elle travaille depuis sa thèse doctorale sur la modélisation des systèmes sociaux, notamment des marchés économiques. Elle explique que, dans l'usage des simulations, ce n'est pas toujours facile de « faire un lien concret avec le réel », mais elle pense que c'est possible[2264]. D'après elle, un tel lien se donne à voir lorsqu'on monte « plein de petites marches », dans un travail cumulatif et incrémental, qui permet petit à petit de se « rapprocher du réel »[2265]. Aucune simulation à elle seule ne pourra saisir tout d'un phénomène, argumente-t-elle : « on ne peut pas prendre ce petit modèle tout seul », car « il faut le voir dans un ensemble, et […] c'est dans son ensemble qu'on va réussir à faire un lien avec le réel »[2266]. Monde réel et monde de la simulation, selon la physicienne, « ne sont pas deux choses séparées »[2267]. Plusieurs typologies d'arguments existent qui peuvent être mobilisées pour défendre cette *onto-épistémologie*. Cette chercheuse nous donne un argument pratique et à la fois personnel et philosophique : « si on suppose que les simulations et les modélisations qu'on fait ne vont jamais apporter quelque chose par rapport au réel […] dans ce cas mon travail est inutile, et le travail peut-être de beaucoup de personnes est inutile »[2268].
En 1988, Stuart Kauffman écrit à propos de la capacité « prédictive » de ses réseaux aléatoires par rapport aux organismes vivants : les réseaux booléens qu'il a inventés « reflètent », selon lui, les propriétés des réseaux génomiques réels[2269]. Pour l'informaticien David Chavalarias, directeur de l'ISC-PIF, les modèles-simulations « captent » quelque chose des systèmes réels : « ils captent les fonctionnements :

[2262] Humphreys, P., *Extending Ourselves*, *op. cit.*, p. 110.
[2263] Entretien avec Clémentine Cottineau, 12.04.17.
[2264] Entretien avec Laetitia Gauvin, 15.02.17.
[2265] *Ibid.*
[2266] *Ibid.*
[2267] *Ibid.*
[2268] *Ibid.*
[2269] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1, p. 10.

quand tu dis ‘preuve d’existence’, ça veut dire [preuve d’existence] des fonctionnements [du système réel] »[2270]. Pour Hugues Bersini, informaticien basé au CENOLI de Bruxelles, si le modèle est « bon », il donne un « pouvoir explicatif accru » aussi bien qu’un « pouvoir prédictif »[2271]. La géographe quantitativiste Denise Pumain considère qu’il y a plusieurs types de formalismes[2272], par exemple les équations différentielles d’une part et les hypothèses théoriques d’autre part : « C’est via le deuxième [chemin] qu’on peut rejoindre la réalité »[2273]. Et les hypothèses théoriques s’inscrivent dans des MBA par des règles qui sont ensuite codées en langage informatique. Dans un article écrit par le groupe de recherche de Pumain, on lit au sujet du problème de l’« équifinalité », autrement appelé « sous-détermination des modèles par les observations » : « one cannot infer that the underlying combination of mechanisms is the one operating ‘in real life’, because several models can lead to the same results (many-to-one) and the same process can lead to several qualitatively different results (one-to-many) »[2274]. Le seul fait d’envisager ce problème, défini par les auteurs de l’article comme un « problème d’évaluation de l’adéquation du modèle par rapport à la vie réelle »[2275], implique de penser qu’une correspondance entre le modèle et le système réel est possible en principe. On souligne que les *dualistes* ne se posent pas ce problème ou alors ils le considèrent comme insoluble ou non-pertinent par définition.

Cottineau est plus prudente, elle se positionne entre les *dualistes* et les *structuralistes*, car pour elle l’idée que son modèle capte les structures formelles et opérationnelles du fonctionnement des villes est plus un espoir qu’une certitude : « Au fond j’y crois et j’aimerais bien que ce soit vrai »[2276]. L’informaticien Reuillon, quant à lui, semble avoir moins de doutes, comme le relate son collègue Mathieu Leclaire :

> « On a déjà un peu discuté avec Romain [Reuillon] qui m’interpellait un peu. On se baladait dans la rue, et il me disait […] ‘Le cerveau est capable de résoudre des équations différentielles’. Je fais, ‘Comment ça, résoudre des équations différentielles ?’. Il dit, ‘Oui, il y a une voiture qui arrive, tu vas pouvoir traverser, tu sais que tu vas pouvoir traverser avant que la voiture arrive et que tu ne vas pas te faire écraser. Donc le cerveau sait résoudre des équations différentielles’. Et du coup, moi ce qui me choquait, c’était de me dire : le cerveau arrive à la conclusion que tu vas pouvoir passer avant la voiture, mais qu’est-ce qui te fait dire que c’est

[2270] Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
[2271] Commentaire d’Hugues Bersini lors d’un séminaire à l’ISC-PIF, 07.11.16.
[2272] « Avec formalismes là j’entends plutôt ce qu’on met derrière les variables » : entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2273] *Ibid.*
[2274] Cottineau, C., Reuillon, R., Chapron, P., Rey-Coyrehourcq, S. & Pumain, D., « A Modular Modelling Framework for Hypotheses Testing in the Simulation of Urbanisation », *Systems*, 2015, n. 3, p. 348.
[2275] *Ibid.*
[2276] Entretien avec Clémentine Cottineau, 12.04.17.

des équations différentielles qu'il résout ? Pourquoi ce n'est pas un autre mécanisme ? »[2277].

Le raisonnement de Reuillon, dont Leclaire doute, s'exprime ainsi : si la nature fonctionne mathématiquement et que notre cerveau calcule par équations différentielles, il est alors possible de la modéliser par des simulations qui intègrent des formules mathématiques. C'est à peu près la même idée que la psychologue cognitiviste Mirta Galesic nous a donnée au SFI : « Whether we could put [into a model] an equation of humans and completely predict, I doubt it because we're not one equation. […] We are millions of soft equations, whether one could predict all possible consequences of that, probably not »[2278]. Michele Tizzoni, physicien statisticien et épidémiologiste computationnel basé à l'ISI de Turin, ramène la simulation numérique aux mathématiques : « ce même problème que tu as posé se pose de manière plus simple quant au rapport entre mathématiques et réalité »[2279]. Sur ce qui fait la liaison entre mathématiques et réalité, Tizzoni est sceptique : « nous ne savons pas pourquoi le monde naturel peut être si bien décrit par le biais du langage mathématique », dit-il, et, pour résumer sa position, il cite le mathématicien Eugene Wigner : « The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve »[2280]. Sa position sceptique ne l'amène pas pour autant à être un *agnostique*, car selon lui « les simulations ont certainement une forme de connexion avec la réalité » à tel point qu'elles peuvent représenter « des vrais mécanismes » du fonctionnement des systèmes réels[2281]. L'informaticien Chapron est très clair sur ce point : système réel et système modèle partagent une même structure, à tel point que si le modèle est bon, « [t]ravailler sur le modèle c'est travailler sur le système réel »[2282].
Le témoignage de la physicienne et épidémiologiste computationnelle Vittoria Colizza[2283] illustre de manière claire et univoque la métaphysique des *structuralistes* :

« [La simulation] est une abstraction de la forme. S'il existe une forme réelle, la forme de la simulation est une abstraction de la forme réelle. […] ça veut dire que tu es en train de perdre certains détails […] certains mécanismes […] ceux que tu ne considère pas comme importants pour ton processus […] Ce que je capte dans GLEaM ce sont les ingrédients que je crois ont un rôle important pour le

[2277] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[2278] Entretien avec Mirta Galesic, 06.10.16.
[2279] Entretien avec Michele Tizzoni, 15.02.17.
[2280] Wigner, E.P., « The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. Richard courant lecture in mathematical sciences delivered at New York University, May 11, 1959 », *Communications on pure and applied mathematics*, 1960, vol. XIII, n. 1, pp. 1-14.
[2281] Entretien avec Michele Tizzoni, 15.02.17.
[2282] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2283] On verra dans le chapitre 15 que ce n'est pas un hasard si les témoignages les plus clairs pour l'idéaltype *structuraliste* viennent des géographes quantitativistes et des épidémiologistes computationnels.

> phénomène de la propagation épidémique et ils sont des ingrédients réels […] nous écrivons des lois [de mobilité, de gravité, etc.] […] l'hypothèse de départ […] [c'est] que ces lois sont […] une description précise et fiable de ce qui se passe dans la réalité. […] Quand [la simulation] fonctionne ça veut dire que les phénomènes que j'ai capturés là-dedans sont effectivement les phénomènes réels »[2284].

Les mots-clés sont « mécanismes », « formes », « structures », soit « capt(ur)ées », soit « reflétées », soit « reproduites » par les modèles. Les *cultures épistémiques* qui se retrouvent le plus ici sont celles des physiciens et des informaticiens. Que l'on parle d'épidémiologistes computationnels ou de géographes quantitativistes, ce sont toujours des visions issues des cosmologies de la physique et de l'informatique qui s'imposent dans la recherche de ces chercheurs et chercheuses. Sur le plan de la performativité des simulations, il est maintenant clair que l'ontologie homologique, qui établit une équivalence formelle entre systèmes réels et simulations, peut justifier une certaine confiance de la part des scientifiques envers leurs *simulats*. Dans le chapitre 15, on verra que la plupart des scientifiques qui s'adressent aux décideurs politiques relèvent de cet idéaltype.

Vitalistes

Au début nous faisions l'hypothèse que l'idéaltype des *vitalistes* pouvait être considéré comme une sous-catégorie de celle des *structuralistes*, car les premiers partagent avec les seconds la même vision à l'égard de l'homologie des structures entre le *simulat* et le système réel. Mais l'accent que les *vitalistes* mettent sur la performativité de leurs simulations les différencie de tous les autres *structuralistes*, car pour les premiers il est moins question de compréhension et de prédiction que de bien qualifier leurs simulations. Les *vitalistes* poussent jusqu'à l'extrême la symétrie entre monde et modèle, en considérant que leurs simulations vivent au sens littéral du mot : pour eux, elles sont une instanciation de l'évolution darwinienne et en tant que telles elles peuvent être étudiées comme des systèmes biologiques réels. Une partie du courant de la vie artificielle – sous-famille de la grande communauté des MBA – se base précisément sur la conviction que les simulations d'organismes vivants, capables de se reproduire et d'évoluer selon les règles de la sélection darwinienne, sont de fait des organismes vivants qui évoluent dans un monde parallèle. En tant que choses vivantes, les simulations des vitalistes représentent la version la plus littérale de l'expression « laboratoire synthétique », qui est commune à nombre de représentants des sciences computationnelles.

Si nous ne connaissons pas de philosophes ayant côtoyé le courant de la vie artificielle, en leur fournissant des arguments pour étayer leur métaphysique, nous pouvons citer en revanche les tenants philosophiques sur lesquels se base la vie artificielle. Ce sont

[2284] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.

les mêmes tenants du courant cognitiviste qui distingue entre *software* et *hardware*, en plaçant le premier au-dessus du second : ce qui compte pour l'intelligence artificielle et la vie artificielle c'est le logiciel, qui traduirait et inscrirait en langage informatique les règles de fonctionnement du cerveau ou les règles de fonctionnement des organismes biologiques ; dans cette optique, la matière dans laquelle s'ancrent ces éléments n'a pas d'importance, comme le dit le père de la vie artificielle Christopher Langton : « [Artificial Life] is an attempt to abstract the principles of life from its material organization, and recreate them in other materials »[2285].
Pour Langton les systèmes complexes en général calculent de l'information. Cette métaphysique computationnelle de la nature on la retrouve chez nombreux *structuralistes*, chez les *monistes*, et aussi chez la plupart des vitalistes :

> « The idea of computation goes beyond what we traditionally call 'computers'. As former SFI scientist Chris Langton eloquently put it : 'The proper domain of computer science is information processing writ large across all of nature'. A key property of complex adaptive systems is their ability to process information – to compute – in order to adapt and thrive in an environment »[2286].

Comme les *structuralistes*, pour les *vitalistes* les règles formelles qui tiennent ensemble les organismes vivants sont les mêmes qui régissent l'évolution de celles digitales : « The objective [of Artificial Life], dit Langton, is not so much to explain in particular natural phenomenon as to claim that a certain kind of phenomenon will be robustly exhibited by a broad variety of systems having a certain abstract or formal structure »[2287]. La vie ne se définit pas par sa matière ou par l'ensemble particulier entre une certaine matière et une certaine forme ; la forme, à savoir l'organisation, est le seul critère de définition de la vie : « [life] is a property of the *organization* of matter, rather than a property of matter itself »[2288]. La conviction de Langton et de ses adeptes c'est que, si l'on capte ces règles-là et qu'on les traduit en langage informatique, le logiciel qui va en sortir ne sera pas seulement une simulation, une imitation ou une reproduction des organismes vivants réels – comme c'est le cas chez les *structuralistes* –, mais il sera du vivant *in silico*, non pas autonome pour ce qui est de sa naissance *ex nihilo*, mais tout de même autonome et imprédictible dans la suite de ses états évolutifs. Le bioinformaticien René Doursat, collaborateur de l'équipe de Nadine Peyriéras à BioEmergences et l'un des représentants du courant de la vie artificielle en France, qualifie sa fascination pour l'ordinateur d'« animiste » :

[2285] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2, p. 17.
[2286] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28, issue 2, p. 18.
[2287] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2, p. 20.
[2288] Langton, C., « Toward Artificial Life », *Whole Earth Review*, 1988, n. 58, pp. 74-79.

« [Quand j'étais plus jeune, l'ordinateur] avait cet aspect vraiment animiste, c'est-à-dire [il] est là, il est en train de me parler, je peux créer mon propre ami »[2289].
L'anthropologue des sciences américain Stefan Helmreich, basé à Stanford, a dédié sa thèse doctorale, et le livre qui en est issu : *Silicon Second Nature*, au SFI et en particulier aux informaticiens qui ont donné vie au courant de la vie artificielle. Nous partageons ses analyses et nous ne croyons pas pouvoir y ajouter des éléments importants. Premièrement, l'anthropologue met en lumière qu'il n'y a jamais eu une unanimité onto-épistémologique au sein de la vie artificielle et que des débats autour de la nature de la computation ont existé depuis sa fondation. Deuxièmement, il souligne que, dans les années 1990, de plus en plus de représentants du courant affirmaient que les ordinateurs sont des mondes, voire des univers littéralement alternatifs[2290]. Par exemple, Helmreich cite un entretien par e-mail avec Walter Fontana, qui lui disait : « Computers are candidates for *being* worlds, not just describing them »[2291]. Autrement dit, à partir du moment où, grâce à ses règles formelles, un organisme s'auto-reproduit et est capable d'une évolution ouverte, les vitalistes sont prêts à le considérer comme authentiquement vivant. Enfin, Helmreich a illustré la conviction métaphysique de ses interviewés quant à l'essence vivante de leurs logiciels : « After a while, dit un représentant de la vie artificielle, the analogy between self-replicating programs and living organisms becomes so perfect that it becomes perverse to call it merely an analogy. It becomes simpler just to redefine the word *organism* to apply to both chemical and software creatures »[2292].

Monistes

Si la vision d'une nature qui calcule de l'information est répandue parmi les *vitalistes* et parmi de nombreux *structuralistes*, la position des *monistes* diffère de toutes les autres en ceci que l'univers, pour eux, est un ordinateur ou du moins un processus computationnel. Le monisme fait référence au fait que les « rails parallèles » (monde et simulation), dont nous avons parlés pour tous les autres idéaux-types, ne font qu'un. Dans cette optique, le rail matériel est complètement déterminé par le rail formel. Il n'y a plus de différence à faire entre la simulation par ordinateur et la nature. Le pouvoir performatif attribué aux simulations numériques par le *moniste* Stephen Wolfram devient ainsi tout autre : selon sa vision, tous les phénomènes naturels et sociaux qui existent peuvent être parfaitement reproduits et expliqués par un ordinateur. Si l'univers est une simulation, la simulation numérique contenue dans un *Personal Computer* a une continuité ontologique complète avec le premier. Autrement

[2289] Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
[2290] Helmreich écrivait dans les années 1990 : aujourd'hui les vitalistes semblent être moins nombreux ou en tout cas moins visibles.
[2291] Helmreich, S., *Silicon Second Nature*, *op. cit.*, p. 103.
[2292] *Ibid.*, p. 123.

dit, la simulation elle-même est un système réel. Elle est presque un univers dans l'univers, et les deux sont faits de la même chose.

Au début de notre entretien avec Wolfram, en racontant son parcours il en vient presque immédiatement à ce qu'il appelle l'« univers computationnel »[2293]. D'abord il nous a parlé de son intérêt pour la physique statistique dès l'âge de douze ans, puis de sa première simulation par ordinateur d'un automate cellulaire en 1972, ensuite de son intérêt pour l'intersection entre la cosmologie et la physique des particules. Après un parcours intellectuel de ce type, ce n'est peut-être pas un hasard si cet entrepreneur et chercheur n'a pas qu'une métaphysique de la nature, mais une véritable cosmogonie inscrite dans une certaine cosmologie. Cette histoire commence par son expérience de conception d'un nouveau langage de programmation[2294]. Wolfram relate que sa première question concerna la nécessité de créer des éléments primitifs pour pouvoir exprimer des computations complexes : « what does one do when he builds a computer language ? […] one tries to take sort of all the computations one can imagine in the world. And one tries to kind of figure out […] what are the primitives from which one can build up all those computations »[2295]. Ensuite le physicien-informaticien compara ce processus à la physique fondamentale et à l'étude des atomes. Il relate avoir commencé à vouloir créer une « théorie des choses » car, les lois physiques de base étant selon lui connues, il restait à voir comment à partir de là on en arrive aux comportements complexes : « at this point we know basic underlying physics, what we don't know is how that physics turns into what we perceive in the world »[2296]. Les « expériences » menées sur et avec les automates cellulaires relèvent d'une sorte de recherche déductive : au lieu de programmer quelque chose de connu pour « expérimenter » sur lui afin de mieux le connaître, l'idée lui est venue de produire des règles de programmation et de voir ce qu'elles donnaient sans s'attendre à des résultats précis. Wolfram affirme donc avoir « découvert » des véritables lois de la nature. Chaque règle produisant un automate cellulaire différent, le physicien britannique identifie avec chaque motif l'expression d'une loi de production d'un objet naturel. Ici le chaos, là-bas un motif visible dans les coquilles de mer ; ici un marché financier, là-bas le comportement d'un fluide hydrodynamique. L'idée fondamentale est la même que celle à la base du SFI : à partir de lois simples on peut parvenir à des systèmes complexes[2297]. Dit autrement, pour Wolfram tout phénomène complexe n'a que des causes simples : « I will show that even remarkably simple programs seem to capture the essential mechanisms responsible for all sorts of important phenomena that in the

[2293] Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16.
[2294] Celui qui est à la base de son logiciel *Mathematica* : https://www.wolfram.com/mathematica/.
[2295] Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16.
[2296] *Ibid.*
[2297] On ne donne pas de priorité à aucun des deux sur ce point, d'autant plus que la question éponymique n'est pas de notre ressort et que l'idée de la simplicité amenant à la complexité est une idée largement partagée par les physiciens en général.

past have always seemed far too complex to allow any simple explanation »[2298]. Ce principe de simplicité s'accompagne d'un Principe d'Équivalence Computationnelle, qui selon Wolfram établit qu'aucun système naturel ne peut jamais fonctionner sur la base de computations plus sophistiquées que celles qui sont exécutées par les automates cellulaires et les machines de Turing[2299]. Le PEC est, d'après son créateur, à la fois une loi de la nature, un fait abstrait et une définition. L'inventeur de *Mathematica* attribue d'ailleurs une certaine importance à son principe :

> « But computation is both a much more general and much more powerful notion than heat. And as a result, the Principle of Computational Equivalence has vastly richer implications than the laws of thermodynamics – or for that matter, than essentially any single collection of laws in science »[2300].

De manière intéressante, Wolfram fournit beaucoup d'éléments collatéraux pour caractériser son ontologie. Par exemple, les êtres humains seraient déterminés par des règles sous-jacentes, même s'ils peuvent avoir une expérience « significative » du libre arbitre[2301]. Les simulations, étant de la même nature que les systèmes réels, seraient des vraies expériences, à partir desquelles Wolfram peut travailler en véritable « naturaliste »[2302] – ce qui montre qu'en quelque sorte les *monistes* peuvent intégrer l'ontologie des *vitalistes*. En ce qui concerne l'aléatoire, cela ne serait que le résultat d'un manque d'outils conceptuels pour déceler les régularités du phénomène qu'on qualifie de chaotique[2303]. Pour continuer : le biologique, du fait du code génétique, serait plus visiblement computationnel que les lois de la physique, qui d'après Wolfram demeurent plus difficiles à penser dans ces termes[2304]. Ensuite, l'essor de l'intelligence artificielle forte est pour ce scientifique « inévitable », tandis que les arguments du style « chambre chinoise » de John Searle sont qualifiés de « bullshit » : « All the stuff that you think is uniquely human will be built as an AI »[2305]. Pour certains aspects l'IA serait déjà une réalité :

> « *Question* : Even creativity ?
> *Wolfram* : We have that. As a matter of fact we have this website, the Wolfram Tones, which creates music that we put online in 2005. And we are just about to

[2298] Wolfram, S., *A New Kind of Science*, *op. cit.*, p. 4.
[2299] *Ibid.*, p. 720.
[2300] *Ibid.*, p. 726.
[2301] *Ibid.*, p. 6.
[2302] *Ibid.*, pp. 51-52.
[2303] *Ibid.*, p. 316.
[2304] *Ibid.*, p. 383.
[2305] Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16.

relaunch it because it is starting. And composers use it to come up with ideas for things »[2306].

Qu'est-ce qui convainc Wolfram de tout cela ? C'est la correspondance morphologique entre les résultats de certains programmes informatiques simples, d'une part, et les systèmes complexes naturels, de l'autre :

« One way to get some idea of this is just to look at pictures of natural systems and compare them with pictures of simple programs. At the level of details there are certainly differences. But at an overall level there are striking similarities. And indeed it is quite remarkable just how often systems in nature end up showing behavior that looks almost identical to what we have seen in some simple program or another somewhere in this book »[2307].

D'après Wolfram, il ne s'agit pas d'une « coïncidence » ou d'une « ruse de la perception » : il y a plutôt une « correspondance profonde » entre certains *simulats* d'automates cellulaires basés sur des lois simples et les systèmes naturels[2308]. C'est ainsi qu'on en arrive à la vision cosmologique et cosmogonique de ce physicien : « And could it even be that underneath all the complex phenomena we see in physics there lies some simple program which, if run for long enough, would reproduce our universe in every detail ? »[2309]. Wolfram en vient à juger que les lois considérées comme « fondamentales » dans la physique ne sont pas en réalité si fondamentales que cela, car elles seraient plutôt un phénomène émergent à partir d'une seule et simple règle computationnelle qui exprimerait l'Univers entier et tout ce qu'il contient[2310]. Wolfram tient à préciser qu'il ne souscrirait l'affirmation selon laquelle l'univers est un ordinateur : « I would never say the Universe is a computer »[2311]. Il soutiendrait plutôt le fait que l'univers est un processus computationnel, ou alors le fait d'un processus computationnel :

« What I would say is we have a thing that is computational, just like we can have a thing that is mathematical and we could say the Universe is mathematical, the Universe is computational. That means there is a computational process which is equivalent to the Universe, which reproduces the Universe »[2312].

[2306] *Ibid.*
[2307] Wolfram, S., *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p. 297.
[2308] *Ibid.*, p. 298.
[2309] *Ibid.*, p. 465.
[2310] *Ibid.*, p. 471.
[2311] Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16.
[2312] *Ibid.*

Cette position rappelle celle de Reuillon, mais ce dernier, à la différence de Wolfram, ne soutient pas que la *cause formelle* soit la seule importante à l'œuvre dans l'univers. Ne pas croire dans l'importance de la matière est qualifié par Wolfram de « stupide » : « if you're trying to study snowflakes and you don't believe in matter, you are doing something stupid. Because snowflakes are made of ice, it's just the way it is. […] there is not really a conflict or difficulty there »[2313]. Ce n'est pas question de nier la matière, donc : ce n'est pas un monisme dans ce sens où la matière est une illusion ou un épiphénomène de la computation. Mais le monisme reste dans le fait que la computation est plus importante que tout le reste : la causalité propre de la matière demeure négligée, reste secondaire. Ce qui compte, dans l'optique des *monistes*, c'est le programme computationnel qui génère l'univers :

> « if we are living in the world and we've got tables and chairs, then matter is important. But if we are trying to find a broader theory of the world, then probably mathematics is more important than the specifics of this crystalline solid or something. So similarly, it is with computation, it's more important, it's a broader category of mathematics »[2314].

Seth Lloyd, physicien du MIT qui travaille sur l'ordinateur quantique, possède une cosmogonie et une cosmologie semblables à celles de Wolfram, qu'il connaît et cite par ailleurs. Dans son livre intitulé significativement *Programming the Universe*, il commence sa narration avec une citation biblique : « In the beginning was the bit »[2315]. Comme pour son collègue britannique, pour Lloyd l'univers calcule, parce qu'il est fait de bits. Par rapport à Wolfram, le physicien du MIT ajoute l'aspect quantique à la computation de l'univers-ordinateur :

> « The universe is made of bits. Every molecule, atom, and elementary particle registers bits of information. Every interaction between those pieces of the universe processes that information by altering those bits. That is, the universe computes, and because the universe is governed by the laws of quantum mechanics, it computes in an intrinsically quantummechanical fashion ; its bits are quantum bits. The history of the universe is, in effect, a huge and ongoing quantum computation. The universe is a quantum computer »[2316].

[2313] *Ibid.*
[2314] *Ibid.*
[2315] Lloyd, S., *Programming the Universe. A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*, New York, Vintage Boos, 2006, p. IX.
[2316] *Ibid.*, p. 3.

L'univers calcule quoi ? « It computes itself »[2317]. En ayant calculé depuis le premier instant, l'univers a commencé par des calculs simples, pour en arriver à des calculs de plus en plus complexes. Affilié au SFI et connaisseur critique de la production de Wolfram[2318], Lloyd maintient la même idée selon laquelle le simple amène au complexe. Quant à la prédictibilité des systèmes, la « nature quantum-computationnelle » de l'univers le rend « intrinsèquement imprédictible », même si d'après lui le libre arbitre n'est qu'une illusion[2319] : « [The details of the universe] can be computed only by a computer the size of the universe itself. Otherwise, the only way to discover the future is to wait and see what happens »[2320]. Jusqu'ici la cosmologie ; pour ce qui est de la cosmogonie, selon Lloyd, à partir du « Bit Bang »[2321], l'univers ne peut que calculer des processus de plus en plus complexes :

> « The digital revolution under way today is merely the latest in a long line of information-processing revolutions stretching back through the development of language, the evolution of sex, and the creation of life, to the beginning of the universe itself. Each revolution has laid the groundwork for the next, and all information-processing revolutions since the Big Bang stem from the intrinsic information processing ability of the universe. The computational universe *necessarily* generates complexity. Life, sex, the brain, and human civilization did not come about by mere accident »[2322].

La description computationnelle n'est pas, pour Lloyd, une manière alternative de décrire l'univers par rapport à la physique, la chimie ou la biologie, mais une manière complémentaire. Toutefois, si dans une « cosmologie conventionnelle » le protagoniste

---

[2317] *Ibid.*

[2318] « The idea that the universe might be, at bottom, a digital computer is decades old. In the 1960s, Edward Fredkin, then a professor at MIT, and Konrad Zuse, who constructed the first electronic digital computers in Germany in the early 1940s, both proposed that the universe was fundamentally a universal digital computer. (More recently, this idea has found an advocate in the computer scientist Stephen Wolfram) » : *ibid.*, p. 52. Puis encore : « Stephen Wolfram has extended and elaborated Fredkin's and Zuse's ideas. The idea of using cellular automata as a basis for a theory of the universe is an appealing one. The problem with this argument is that classical computers are bad at reproducing quantum features, such as entanglement. Moreover, as has been noted, it would take a classical computer the size of the whole universe just to simulate a very tiny quantum-mechanical piece of it. It is thus hard to see how the universe could be a classical computer such as a cellular automaton. If it is, then the vast majority of its computational apparatus is inaccessible to observation » : *ibid.*, pp. 156-157.

[2319] « 'Free will' refers to our apparent freedom to make decisions. For example, when I sit down in a restaurant and look at the menu, I and only I decide what I will order, and before I decide, even I don't know what I will choose. That is, our own future choices are inscrutable to ourselves. (They may not, of course, be inscrutable to others. For years my wife and I would go for lunch to Josie's in Santa Fe. I, after spending a long time scrutinizing the menu, would always order the half plate of chiles rellenos, with red and green chile, and posole instead of rice. I felt strongly that I was exercising free will: until I chose the rellenos half plate, I felt anything was possible. My wife, however, knew exactly what I was going to order all the time) » : *ibid.*, p. 36.

[2320] *Ibid.*, p. 4.

[2321] *Ibid.*, p. 46.

[2322] *Ibid.*, p. 5.

est l'énergie[2323], dans une cosmologie computationnelle comme celle de Lloyd le protagoniste devient l'information, qui ne remplace par la première mais en constitue le pendant : « Ultimately, information and energy play complementary roles in the universe : Energy makes physical systems do things. Information tells them what to do »[2324]. Dans cette optique, le *monisme* est encore plus évident chez Lloyd que chez Wolfram : « Because the universe can perform quantum computation and a quantum computer can simulate the universe, the universe and a quantum computer have the same information-processing power : they are essentially identical »[2325]. La question, dit-il ensuite, n'est pas de postuler une nature digitale de l'univers : comme les ordinateurs peuvent être analogiques, les qubits peuvent aussi être continus, avoir une « nature ondulatoire », car ce qui rapproche un ordinateur analogique d'un ordinateur digital c'est que tous les deux ont affaire avec de l'information[2326].
Ces deux représentants, à leur façon, des SSC ne sont pas les seuls qui entretiennent ce type d'ontologie. Jean-Paul Delahaye, que nous avons rencontré pour en savoir plus sur la théorie de la complexité de Kolmogorov, connaît la tradition du SFI et a participé à l'écriture de la feuille de route du RNSC français. Informaticien et mathématicien, Delahaye considère que tout est assimilable à un calcul. Son ontologie assumée rappelle celle de Lloyd, mais le chercheur français ne se limite pas à décrire sa vision de la nature : il affirme aussi que la physique computationnelle va s'imposer dans le futur comme le nouveau paradigme de la physique :

> « c'est une vision du monde physique que j'ai. Il y a des phénomènes qui sont liés à l'énergie. Concept fondamental de la physique, de même que la masse, que l'attraction, que les forces électromagnétiques. Pas question de remettre en question ça. Mais je dis, il y a un autre concept, qui est un concept de physique, qui est en train d'émerger, que les physiciens acceptent progressivement, mais qui dans la théorie n'est pas encore bien formulée […] Les molécules se constituent par un mécanisme qui est du calcul […] Un calcul qui a de la mémoire […] C'est une conviction chez moi, c'est une certitude que les choses se sont passées comme ça […] Au début avec le concept d'énergie c'était la même chose. C'était un concept vague et fugace […] Malgré tout, les physiciens ont continué à purifier ce concept et ils sont arrivés à un concept pur que plus personne ne conteste […] Je pense qu'il est en train de se passer la même chose avec la notion de calcul […] La physique qui vient c'est une physique informationnelle, je suis certain de ça »[2327].

[2323] *Ibid.*, p. 39.
[2324] *Ibid.*, p. 40.
[2325] *Ibid.*, p. 149.
[2326] *Ibid.*, p. 152.
[2327] Entretien avec Jean-Paul Delahaye, 14.01.16.

Le concept d'information, qui pour Delahaye « n'est pas une métaphore », peut paraître réductionniste, mais comme réductionniste semble le concept d'énergie, et pourtant, argument-t-il, personne ne le nierait aujourd'hui[2328]. De manière parallèle, ce scientifique est convaincu non pas tant du fait que les êtres humains vont être remplacés par des transhumains ; pour lui, l'humanité sera tout à fait remplacée par les machines, au sens que les structures biologiques disparaîtront : le transhumanisme pêche, selon lui, de se focaliser trop sur l'homme, tandis que l'être humain est simplement destiné, selon Delahaye, à devenir un ordinateur.
Avec les *monistes*, la question n'est plus si les simulations peuvent dire quelque chose sur le réel ou pas : il s'agit plutôt de voir le réel comme quelque chose qui est fait de la même substance et de la même essence que la simulation. Et si le cosmos n'est qu'une simulation, la simulation par ordinateur aura évidemment toutes les caractéristiques du monde réel. Le pouvoir performatif attribué à la simulation numérique est, par conséquent, inverse et spéculaire à celui qui lui est attribué par les *dualistes*.

Conclusion

La littérature des SHS sur la simulation par ordinateur a tendance – surtout en philosophie des sciences – à entretenir les métaphysiques (souvent computationnelles) qu'elle étudie, au lieu de les mettre à distance. Elle tend aussi à ne s'occuper que de l'aspect cognitif et/ou épistémologique, avec des effets normatifs plus ou moins implicites. Nous soutenons qu'une telle approche n'aide pas à répondre à la question posée par Mary Morgan dans son livre sur les modèles économiques : « How does working with [models] tell us anything about the world ? »[2329]. Et on a suivi un autre chemin pour aborder cette question d'un point de vue sociologique. En collectant les positions onto-épistémologiques des scientifiques de la complexité et en les ordonnant dans une typologie, ce chapitre montre que l'usage des simulations numériques de la part des scientifiques computationnels n'est pas compréhensible si l'on oublie d'enquêter sur leurs visions du monde, de la nature et de la société. En outre, le pouvoir – explicatif, prédictif ou autre – que les praticiens des modèles digitaux attribuent à ces derniers dépend donc de l'entrelacement entre leurs considérations épistémiques et leurs considérations métaphysiques. Enfin, les cinq positions onto-épistémologiques analysées ici, qui ne sont ni exhaustives ni définitives, s'accordent souvent de manière privilégiée à certaines *cultures épistémiques* plutôt qu'à d'autres.
Terminons ce chapitre avec une remarque sur le lien entre *cultures épistémiques* et *onto-épistémologies.* Nous n'avons pas voulu accréditer l'idée d'un automatisme entre le niveau du connaître et le niveau de l'être. Varenne affirme qu'« [e]n sens strict, il

[2328] *Ibid.*
[2329] Morgan, M.S., *The world in the model*, *op. cit.*

n'y a pas de modèle qui soit dépourvu de tout engagement ontologique »[2330] ; cela dit, il soutient que la métaphysique et la philosophie des sciences sont autonomes, au sens où, surtout dans des savoirs numériques comme les SSC, « aucun profil ontologique n'impose plus systématiquement ni univoquement un profil épistémologique ou méthodologique »[2331]. Également, nous ne croyons pas qu'il y ait une correspondance nécessaire entre une épistémologie spécifique et une ontologie donnée. Il demeure empiriquement démontrable, toutefois, que les physiciens ayant migré vers d'autres disciplines – économie, géographie, épidémiologie etc. – tendent à avoir une position *structuraliste*, en fonction de laquelle ils proposent leurs modèles aux pouvoirs publics et privés à des fins de conseil, de planification et de *preparedness*. Ces éléments vont apparaitre sous un jour nouveau dans le chapitre 15 consacré aux engagements épistémiques d'un certain nombre de scientifiques des systèmes complexes.

[2330] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.*, p. 514.
[2331] *Ibid.*, p. 25.

Aparté 4 – Chapitre 14 – Critique de la raison computationnelle

La métaphysique conduit très vite à des questions épistémiques et politiques. Pour étayer cette affirmation, nous allons en premier lieu déconstruire l'image très répandue des sciences computationnelles comme autant de savoirs dématérialisés, créant une « culture immatérielle » – comme certains l'ont qualifiée. On montrera à ce propos que les SSC reposent sur une lourde et coûteuse machinerie pour fonctionner. En deuxième lieu, nous mènerons une *critique de la raison computationnelle*, en montrant comment l'oubli de la matérialité du monde expose à des dangers d'ordre à la fois épistémique, ontologique et politique.

Contrairement à ce qui précède, le point de vue est ici explicitement critique. Le but de ce chapitre n'est pas de présenter du matériau inédit, même si on en mobilise dans la première section, ni d'avancer des analyses nouvelles. En effet, les thèses de la première et de la deuxième section ne sont point innovantes. Nous voulons simplement les mobiliser et les appliquer à une partie (considérable mais pas totale) des SSC, en tant que savoirs numériques ayant une certaine influence sur l'épistémologie spontanée et savante des chercheurs et des chercheuses, sur l'imaginaire collectif, ainsi que sur l'économie et la politique. En un mot, ce chapitre philosophico-normatif est un plaidoyer contre le règne de l'information au détriment de la raison matérielle.

Les sciences de la complexité, des sciences immatérielles ?

Il est coutume de décrire la société digitale comme une société dématérialisée. L'image du *cloud* (nuage) et la métaphore omniprésente du « réseau », l'immédiateté et l'agilité des échanges et des stockages numériques, l'ubiquité des connexions et l'invisibilisation des câbles sous-marins et des centres de données nécessaires aux performances de l'Internet, autant d'éléments qui donnent l'impression que l'on va vers un mode de vie de plus en plus incorporel, impalpable, éthéré. L'apparente souplesse du numérique suggère une intangibilité presque spirituelle, la légèreté de ses infrastructures laisse penser à une société plus *eco-friendly*. La dématérialisation est une promesse des grandes compagnies du numérique[2332], des tenants des « villes intelligentes » et notamment des *data centers*[2333], mais aussi des politiques de la recherche[2334]. Concernant les sciences computationnelles, des philosophes ont proposé

[2332] Bidan, M., « L'économie numérique est une industrie lourde (1) : donner ces données », *The Conversation*, novembre 24, 2015 : https://theconversation.com/leconomie-numerique-est-une-industrie-lourde-1-donner-ces-donnees-50674 ; Flipo F., Draetta L., Boutet I., Deltour F., *Ecologie des infrastructures numériques*, Hermès Science Publications, Paris, 2007.

[2333] Carnino, G. & Marquet, C. « Les *datacenters* enfoncent le *cloud* : enjeux politiques et impacts environnementaux d'internet », *Zilsel*, vol. 3, n. 1, pp. 19-62.

[2334] « Dématérialiser, formater, préserver, mutualiser, classifier, hiérarchiser, mettre en accès et valoriser les données produites par la recherche du CNRS et élargir la démarche à la production de la recherche française et européenne » : Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'Etat, 25 juin 2009, p. 36.

de voir les nouvelles pratiques de production des savoirs par ordinateur comme ayant généré une « culture immatérielle » :

> « the interesting point for me, écrit l'épistémologue Claus Pias, is that the 'immaterial culture' of the simulation laboratory (if I be allowed to term it such) is infinitely faster and more adaptable than material culture and that a new quality emerges from all this […] the sensibility for the material culture of science that has developed over the last few decades requires a corresponding alertness to the immaterial culture of computer simulations that should be expressed and elaborated through the use of historical instances »[2335].

Ce philosophe soutient que les méthodes classiques des STS, justement très attentives à la matérialité des pratiques scientifiques, sont inadéquates pour aborder les sciences computationnelles : « the methods employed by Laboratory Studies to excavate them are not easily transferable »[2336]. Mais comme cela a été plusieurs fois montré par des sociologues, des scientifiques, des ingénieurs et des journalistes, derrière la promesse de légèreté du monde digital et de la dématérialisation de l'économie plus généralement, se cache toujours une lourde matérialité, puisque le support pour l'information n'est pas éliminé mais seulement déplacé[2337].
Les sociologues et les historiens des sciences distinguent entre différents types de science, selon la taille de leurs infrastructures. Les grands projets localisés et centralisés comme le CERN et les grands projets décentralisés mais fortement interconnectés et fédérés, comme la « vaste machine » climatologique ou comme le *Human Genome Project*, relèvent de ce qui a été nommée *Big Science*[2338]. L'appellation de *Small Science* est réservée aux efforts de recherche individuels ou des petits groupes. Or, si dans le cas de la biologie, l'infrastructure informatique permet aux projets de recherche d'aller vers des configurations relevant d'une mégascience[2339], pour les SSC l'usage de l'ordinateur a été principalement inscrit dans une logique de petite science, plus artisanale. Ceci dit, cela n'en fait pas une « culture immatérielle » comme l'affirme Pias. Tous nos interviewés sont concernés par la problématique de la *friction computationnelle* décrite par Edwards : en ne regrettant pas le passé, lorsque pour réaliser des simulations simples il fallait des semaines, voire

---

[2335] Pias, C., « On the epistemology of computer simulation », *op. cit.*, pp. 52-53.
[2336] *Ibid.*, p. 53.
[2337] Jancovici, J.-M., « La dématérialisation de l'économie, mythe ou réalité ? », *La Jaune et la Rouge 2007 : Croissance et environnement*, rapport dans l'archive de l'Assemblée Nationale : http://www.assemblee-nationale.fr/13/cr-grenelle/jancovici-complts.pdf ; Bihouix, P., *L'âge d'or des low tech, Vers une civilisation techniquement soutenable*, Paris, Seuil, 2014.
[2338] Weinberg, A.M., « Impact of Large-Scale Science on the United States », *Science*, 1961, vol. 134, n. 3473, pp. 161-164.
[2339] Vermeulen, N., « Growing a Cell in Silico: On How the Creation of a Bio-object Transforms the Organisation of Science », dans Vermeulen, N., Tamminen, S. & Webster, A., *Bio-Objects. Life in the 21st Century*, Farnham, Burlington, Ashgate, 2012, p. 183.

des mois, les chercheurs et chercheuses des sciences de la complexité se réjouissent des nouvelles technologies informatiques, parues depuis les années 2000, car elles leur permettent de conduire un grand nombre de simulations d'une certaine difficulté. La première préoccupation des instituts de la complexité dans le monde a toujours été donc de se doter d'une puissance de calcul conséquente pour leurs recherches, soit en achetant des conglomérats d'ordinateurs à maintenir *in situ*, soit en louant du temps de calcul auprès de plateformes publiques ou privées, comme celles du CNRS ou d'Amazon.

Dans le cas du SFI, où l'absence de laboratoires de chimie, de physique ou de biologie peut suggérer l'inexistence de toute infrastructure de recherche, en réalité l'outillage informatique nécessaire au travail computationnel demande des investissements, du personnel dédié, des espaces, des systèmes de climatisation et bien sûr des dispositifs informatiques importants. Le premier achat conséquent d'ordinateurs de la part du SFI se fait en avril 1988 : trois modèles 4/110 de la Sun Microsystems s'ajoutaient à des micro-ordinateurs Apple-Macintosh et IBM AT[2340]. À cette époque, l'institut possédait déjà une connexion 56kb avec la Technet du Nouveau Mexique, ancêtre d'Internet. En 1992, Scott Yelich, ex-administrateur de systèmes à la NASA, rejoint le SFI pour gérer les systèmes informatiques de l'institut[2341]. À l'époque, les équipements comprennent : « 20 Suns, 20 Macs, 3 IBMs, 1 SGI, 1 NEXT, 4 PostScript-capables laser printers, and 2 bridged local networks »[2342]. L'actuel directeur de la technologie de l'institut américain, Nathan Metheny, nous a expliqué que la première tentative d'acheter un *cluster* d'ordinateurs parallèles a été faite en 2001 : « In-house assembled pieces […] Penthium three 500 megahertz machines […] it was called the 'Beowulf cluster' »[2343]. Une deuxième grappe de « sun Microsystems blade 100 » fut achetée peu après. Il s'agissait de 24 ordinateurs empilés les uns sur les autres sur une table, qui ne nécessitaient pas de refroidissement spécifique. Après un déclin du besoin de puissance de calcul pendant quelques années, en 2013, lors de l'arrivée de nouveaux postdoctorants à l'institut, Metheny s'occupa de constituer un nouveau *cluster*, s'agissant de quatre ordinateurs individuels multi-cœurs, avec 64 cœurs chacun pour un total de 256. Pour un coût de cinquante mille dollars, l'ensemble atteignait un téraoctet de mémoire. Cette grappe est contenue dans une guérite à l'entrée du domaine du SFI. Elle est dotée d'un système de climatisation approprié, consommant la plupart de l'énergie nécessaire au maintien de cette puissance de calcul. D'après Metheny, l'usage des ressources computationnelles n'étant pas énorme, l'institut préfère avoir sa structure propre au lieu de louer du temps de calcul à des grilles externes.

[2340] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2, p. 3.
[2341] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1, p. 30.
[2342] *Ibid.*
[2343] Entretien avec Nathan Metheny, 27.09.16.

En France, l'ISC-PIF s'est également doté d'une grille de calcul et de bien d'autres services informatiques :

> « Depuis sa création, l'ISC-PIF a investi dans plusieurs solutions informatiques et a développé des services en ligne :
> - Machine de calcul (48 cœurs) accessible à distance via un bureau virtuel
> - Ferme de calcul (200 cœurs)
> - Grille de calcul (vo.iscpif.fr)
> - Baie de disques > 100 To pour le stockage et le backup de données à traiter
> - Service de partage de fichiers sans limite de taille (web-dav) http://share.iscpif.fr
> - Hébergement de projets logiciels https://forge.iscpif.fr
> - Plate-forme générique de calculs en 'workflow' : http://www.openmole.org »[2344].

Le premier investissement de l'institut francilien, en tant que GIS, s'élevait à hauteur de 700.000 euros, montant qui est de nouveau investi environ tous les cinq ans, lorsque les machines doivent être remplacées :

> « C'est la loi de l'informatique, affirme le directeur de l'ISC-PIF David Chavalarias. […] au bout de cinq ans, soit la machine est cassée, parce que ça tient plus, soit les performances énergétiques sont telles que c'est plus cher de la garder en service, en termes de coûts électriques, plutôt que d'acheter une machine neuve, qui sera plus puissante et consommera moins »[2345].

Mais la grille *in situ* n'est pas la seule infrastructure informatique dont disposent les scientifiques de la complexité franciliens. Des laboratoires faisant partie du RNSC, notamment de biologie embryonnaire et de géographie quantitative, se sont appuyés sur la Grille de Calcul Européenne, dont ils louent du temps de calcul. La grille est un *cluster* de différents ordinateurs à l'échelle européenne, capable de supporter les centaines de milliers, voire les millions de simulations dont ont besoin ces groupes de chercheurs et de chercheuses, pour explorer les paramètres de leurs modèles[2346]. En revanche, comme l'écrivent dans un article des géographes associés à l'ISC-PIF, l'usage de ces grilles ne va pas sans entraves :

> « we decided to develop a calibration framework that could run on both expensive supercomputers and on computing grids, which make computing power more

[2344] Région Ile-de-France, « Domaine d'Intérêt Majeur (DIM). 'Problématiques transversales aux systèmes complexes'. Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France (ISC-PIF) », appel à projet 2014.
[2345] Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
[2346] Entretien avec Paul Villoutreix, 10.03.15.

> accessible by federating it on a worldwide scale. […] However, computing at such a large scale is a true challenge. It supposes orchestrating the execution of tens of thousands of instances of the model on computers distributed all over the world. The cumulative probability of local breakdowns and the impossibility of distributing the workload optimally on the grid system makes its effective use very difficult »[2347].

Pour donner une idée de la *friction computationnelle*, métaphore matérielle par définition, les 500 millions de *runs* exécutés par ces géographes auraient besoin de vingt ans pour être exécutées sur un *Personal Computer*[2348]. Il est évident que les savoirs numériques sont tout sauf immatériels, légers, peu coûteux, agiles ou écologiques.
Nous pourrions multiplier les exemples, mais abordons maintenant l'origine de l'*illusion de l'immatérialité* apparemment liée aux pratiques, aux épistémologies et aux ontologies des sciences par ordinateur.

De la métaphore à la métaphysique computationnelle

En étudiant le courant de la vie artificielle, né au SFI à la fin des années 1980, l'anthropologue Stefan Helmreich a voulu faire une « intervention politique critique dans la réinvention de la nature en cours dans la vie artificielle », en proposant un « argument contre la naturalisation digitale des visions conventionnelles de la vie et une pétition pour un plus grand sens du possible dans le monde de la vie artificielle »[2349]. De manière analogue, nous voudrions porter l'attention sur la métaphysique sous-jacente aux sciences computationnelles en général – dont les SSC ne sont qu'un exemple –, métaphysique qui est véhiculée à travers leurs simulations, leurs cadres épistémiques, leurs discours et leurs interventions dans le monde sociopolitique et économique. Il est important de pointer l'invisibilisation du monde matériel que produisent les sciences computationnelles.
Le premier élément de la métaphysique de l'information porte à voir les systèmes physiques, chimiques, biologiques, sociaux, infrastructurels comme des réseaux informationnels qui, en tant que tels, peuvent être étudiés par une seule science. George Cowan, dans son éditorial au bulletin du SFI de l'été-automne 1989, nous plonge directement dans l'univers des SSC :

> « It is becoming increasingly clear that essentially all complex, adaptive systems are designed to process information. They are equipped to gather information from their

[2347] Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R. & Pumain, D., « Half a billion simulations : evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2015, vol. 42, p. 307.
[2348] *Ibid.*, p. 308.
[2349] Helmreich, S., *Silicon Second Nature*, *op. cit.*, p. 20.

external environments and to react to it or store it internally in a compressed form and to retrieve it when necessary »[2350].

Cowan compare tous les systèmes naturels et humains à des ordinateurs qui calculent, entreposent et réactivent de l'information. Le passage suivant, issu du livre vulgarisateur de l'informaticien belge Hugues Bersini, est encore plus explicite :

« Lorsqu'on ramène [l]es réseaux à leur description minimale, délestés ainsi de toute terminologie propre à chaque discipline, sous la forme d'un ensemble de variables évoluant dans le temps en fonction des interactions avec les autres variables auxquelles elles se trouvent connectées, ce que l'on découvre des réseaux biologiques doit pouvoir s'appliquer, en partie, à la sociologie ou à l'informatique. […] La science est toujours en quête d'universaux, à la recherche de structures et de mécanismes inférentiels communs dans des réalités apparemment distinctes. […] on en découvre partout où l'on pose les yeux, quel que soit l'angle ou la profondeur de vue que l'on adopte »[2351].

« [L]es réseaux sont inévitables, nous dit Bersini, et […] ils jouent un rôle déterminant dans nos vies »[2352]. En outre, tous les éléments qui les composent sont en communication intégrée et constante entre eux, tout comme dans un réseau électrique.
Le physicien hongrois-américain Albert-László Barabási est connu pour ses travaux sur les réseaux et pour ses œuvres de vulgarisation de la théorie associée. En faisant référence à la notion de « petit monde », étudiée par le physicien Duncan Watts et par le mathématicien Steven Strogatz, il écrit dans son livre grand-public *Linked* que « l'on s'est aperçu que nous vivons dans un petit monde, dans lequel tout est relié à tout autre chose »[2353]. Dans un monde interconnecté (« society is a very dense web »[2354]), le mouvement est facile, fluide, immédiat. Si l'on jette un œil aux visualisations des simulations de réseaux, l'on voit clairement les interconnexions mais aussi les « sauts » que les interconnexions permettent. En raison de cette nature quasi-électrique du monde, les éléments qui composent les systèmes sont, dans cette optique, des nœuds connectés par des arêtes, nœuds qui peuvent être petits ou grands et dont les interactions peuvent être étudiées par les mathématiques de la physique statistique. Ainsi, la figure du physicien-informaticien devient le titulaire des clés d'accès, d'étude ou d'exploitation des réseaux naturels et sociaux. Il devient le spécialiste de tout, capable de déterminer le comportement des nœuds, par des règles

[2350] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2, p. 2.
[2351] Bersini, H., *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie : l'omniprésence des réseaux*, Paris, Vuibert, 2005, p. XVIII-XIX.
[2352] *Ibid.*, p. XXVIII.
[2353] Barabási, A.-L., *Linked. How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*, Londres, Plume, 2003, p. 7.
[2354] *Ibid.*, p. 30.

statistiques relativement simples : « The fundamental hypothesis behind simulating complex systems is that the apparent complexity of the system one is trying to model is due to a few simple components interacting according to simple rules that are then incorporated in the program »[2355]. Le spécialiste des réseaux peut prédire, car le libre arbitre n'est qu'une illusion : « We all have free will, concède Barabási, […] Yet no matter what we did, we unconsciously followed the same law – a power law. Conceptually simple, yet rather surprising »[2356]. Même si les systèmes complexes en général, et les réseaux en particulier, sont constitués d'agents autonomes, l'étude des effets macroscopiques de leurs interactions en effacent l'*agency* individuelle. Plus profondément, c'est toute la physique de l'univers qui est basculée par l'introduction de l'information comme principe agissant aux côtés de la matière et de l'énergie. Jean-Paul Delahaye, mathématicien et informaticien spécialiste de la complexité de Kolmogorov mais connaisseur des SSC et collaborateur de certains de leurs représentants, explique ce point de manière claire et nette :

> « Au début […] le concept d'énergie c'était […] un concept vague et fugace […] Malgré tout, les physiciens ont continué à purifier ce concept et ils sont arrivés à un concept pur que plus personne ne conteste […] Je pense qu'il est en train de se passer la même chose avec la notion de calcul. Pour moi c'est pas une métaphore. C'est potentiellement à terme un concept aussi important que le concept d'énergie […] je pense que le monde calcule et qu'il manipule de l'information, c'est pas un réductionnisme, c'est un constat, c'est la physique qui vient […] C'est une vision, c'est comme ça que je vois le monde »[2357].

Or, si l'information est partout et que le monde calcule, le spécialiste de l'information (qu'il soit informaticien, mathématicien ou physicien) peut s'autoriser des affirmations à propos d'à peu près tout. Par exemple, en touchant à l'ordre économique global Barabási considère, contre les activistes anti-globalisation, que les fusions entre grandes compagnies sont inévitables dans un système complexe :

> « antiglobalization activists […] accuse big corporations of dictating everything from policy to fashion. They are unavoidable, however, if we view the economy as a complex network, whose nodes are companies and whose links represent the various economic and financial ties connecting them. Indeed, in a network economy the hubs must get bigger as the network grows. To satisfy their hunger for links, nodes of the business web learn to swallow the smaller nodes, a novel method

[2355] Pagels, H.R., *The Dreams of Reason, op. cit.*, p. 89.
[2356] Barabási, A.-L., *Bursts. The Hidden Patterns Behind Everything We Do*, New York, Dutton, 2010, p. 405.
[2357] Entretien avec Jean-Paul Delahaye, 14.01.16.

unseen in other networks. As globalization pressures the nodes to grow bigger, mergers and acquisitions are a natural consequence of an expanding economy »[2358].

La maîtrise des réseaux, dans un monde en réseaux, devient ainsi nécessaire à la croissance économique des entreprises : « As links and connections take over, understanding network effects become the key to survival in a rapidly evolving new economy »[2359]. Les données, les *Big Data*, deviennent ainsi la ressource première : il faut tout faire pour les collecter et pour les rendre accessibles.
Pour résumer, les points de l'ontologie informationnelle peuvent être énumérés comme suit :

- Elle est digitale, à savoir discrète : le monde fonctionne comme une suite de zéro et de un ;
- Elle est fluide, les communications se font de manière immédiate ;
- Elle est dématérialisée ;
- Elle est déterministe, même quand il y a des phénomènes stochastiques ;
- Elle est légaliste : tout est basé sur des règles, souvent simples ;
- Elle se base sur un individualisme méthodologique paradoxal, qui finit par effacer les individus au bénéfice du niveau macroscopique, dit « émergent », qui se manifeste sous forme de statistiques.

Mais quelle est l'origine de cette vision du monde ? D'abord elle trouve son départ et sa légitimation dans les travaux d'Alan Turing, puis dans ceux de John von Neumann, ensuite dans ceux des cognitivistes comme Marvin Minsky et Seymour Papert. Le premier a imaginé une machine de Turing universelle telle qu'une intelligence capable de calculer comme un humain, indépendamment de l'infrastructure physique dans laquelle elle est incarnée. Le deuxième a tissé la distinction entre analogique et digital, imposant le langage discret des *bits* dans le développement des ordinateurs (les premiers étaient analogiques). Et les derniers ont lancé le courant cognitiviste qui, suivant la séparation entre *hardware* et *software*, définissent l'esprit comme étant éminemment de nature logicielle. Le philosophe Jean Lassègue illustre bien l'idée de l'indépendance du logiciel par rapport à la matière dans laquelle il est inscrit :

« Confronté à cette difficulté de principe, on s'en tient généralement à l'idée que le traitement logiciel et le dispositif matériel n'ont aucun rapport de dépendance réciproque puisque le traitement logiciel, quel que soit le formalisme employé et pourvu qu'il respecte la contrainte de l'itération pas à pas, peut être physiquement effectué par n'importe quelle incarnation matérielle de la machine de Turing,

[2358] Barabási, A.-L., *Linked, op. cit.*, p. 200.
[2359] *Ibid.*

pourvu que cette incarnation matérielle particulière respecte la contrainte du déterminisme laplacien »[2360].

La théorie de l'information, la cybernétique, la biologie moléculaire, puis la vie artificielle, le mouvement *cyberpunk*, la littérature et la filmographie de science-fiction sur l'Intelligence Artificielle, sont les productions culturelles qui, parmi d'autres, ont répandu la métaphysique computationnelle dans l'imaginaire social. Elle était née comme une métaphore, selon laquelle la vie, l'esprit, le monde fonctionnaient « comme » des réseaux. Mais l'usage continu dans les travaux scientifiques, l'investissement public et privé dans des promesses tonitruantes comme celles émises par le *Human Genome Project*, ainsi que sa diffusion dans la culture populaire, ont fait tomber le « comme » de la métaphore informationnelle, en transformant une analogie heuristique, partielle et temporaire – car une parmi d'autres – en une affirmation ontologique, en une vérité épistémique absolue[2361].

La raison computationnelle à l'épreuve de la critique

Nous voudrions affirmer ici que cette vision du Tout-réseau, du Tout-informationnel est fausse et dangereuse. Le monde n'est pas un réseau électrique, tout n'est pas immédiatement, littéralement et inévitablement connecté à tout autre chose (du moins pas de la même manière), et la matière n'est nullement secondaire face à l'information ou à l'organisation formelle. Il ne s'agit pas pour nous de nier les théories scientifiques des praticiens des SSC et des sciences computationnelles en général, mais les SHS ont leur mot à dire sur la manière de voir et de décrire le monde. D'autant plus que les ontologies ont une portée sociopolitique.

La métaphore computationnelle trouve son origine dans des groupes sociaux spécifiques, qui expriment souvent leur passion pour l'informatique, la programmation, la logique, les langages, le *software*, les jeux vidéo. C'est une *culture épistémique* de la règle rationnelle, claire et simple, univoque ; une culture de l'abstraction et de l'ordre ; une culture du contrôle patriarcal et de la création *ex nihilo*. Cette vision, qui n'est qu'une parmi d'autres, finit par s'imposer de plus en plus dans les sciences, dans l'économie et dans la vie politique. Le rapport que les scientifiques numériques ont aux systèmes étudiés rappelle la vision judéo-chrétienne et cartésienne de la création et de la maîtrise du monde, le scientifique étant souvent comparé à un dieu ou à un démiurge : « en informatique, vous créez un monde. Au sein des limites de l'ordinateur, vous êtes le Créateur. Vous avez comme mission ultime de contrôler

[2360] Lassègue, J., « Turing, entre le formel de Hilbert et la forme de Goethe, dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, p. 140.

[2361] Atlan, H., *Le vivant post-génomique. Ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?*, Paris, Odile Jacob, 2011, pp. 53-54.

tout ce qui se passe »[2362]. Bien sûr l'ordinateur y est souvent vu d'abord comme une puissance de calcul, mais aussi et surtout comme une machine pensante, voire vivante : « En substance, le modèle informatique pense par lui-même […] Le programmeur crée des mondes nouveaux, mondes qui évoluent d'eux-mêmes »[2363]. Le rapport à la nature et au monde social de ceux et celles qui portent une ontologie digitale du cosmos n'est pas neutre et anodine. Cette section plaide pour un retour à la métaphore computationnelle, pour sortir du risque de *totalitarisme de l'information* : les réseaux, de par leur métaphysique englobante et leur omniprésence culturelle, risquent d'opprimer d'autres manières de voir le monde, d'autres savoirs et d'autres pratiques, d'autres formes de vie, qui sont complémentaires, tout aussi importantes ou plus importantes que celles drainées par la métaphore de l'information.

De quels dangers parlons-nous ? Il faut bien voir que l'ontologie informationnelle accomplit un certain nombre d'invisibilisations. En considérant la forme comme plus importante que la matière, elle oublie que l'information pointe toujours sur le monde matériel et que sa nature dépend de la matière dans laquelle elle est inscrite. Une vie basée sur le carbone ne donne pas les mêmes possibilités et les mêmes contraintes qu'une vie basée, par exemple, sur le silicium. L'image du réseau aplatit le monde, le dématérialise et le fluidifie, en négligeant les frictions, les résistances, les obstacles, les barrières matérielles, qui demeure pourtant omniprésente. Si j'effectue un trajet en métro qui est plus long en termes de kilomètres parcourus, mais plus court en termes temporels de par la moindre quantité de correspondances à faire, et qu'un incident survient et m'oblige à remonter à la surface et à trouver une alternative (taxi, bus, vélo, marche à pieds), la résistance des kilomètres à parcourir – en termes énergétiques, temporels, économiques – redevient soudainement tangible et sensible. La fluidité et la platitude d'un monde en réseau fait à la longue oublier aussi les asymétries de pouvoir, la légitimité et le prestige des individus ou des institutions, les inégalités à partir de la fracture numérique, les inerties des œuvres architectoniques et de l'urbanisme, qui restent, comme l'écrit Francis Chateauraynaud, « voilés par la prégnance d'une logique de réseaux dans laquelle tous les liens semblent facilement activables et réversibles, donnant l'impression que les obligations sont en réalité peu contraignantes – et pour le moins négociables »[2364].

Plus que de métaphysique computationnelle, ne peut-on parler d'une *idéologie computationnelle* ? Résumons, sans oublier les nuances, les huit dimensions qui selon nous la caractérisent :

- La dimension épistémologique, selon laquelle les simulations expliquent et prédisent les systèmes réels, puisqu'elles seraient une « preuve » du fonctionnement structurel du phénomène étudié ;

[2362] Bersini, H., *Des réseaux et des sciences*, *op. cit.*, p. XX.
[2363] *Ibid.*, p. XXII.
[2364] Chateauraynaud, F., « L'emprise comme expérience », *op. cit.*

- La dimension hiérarchique des savoirs, la physique et l'informatique régnant sur l'ensemble des connaissances adéquates à saisir le monde ;
- La dimension esthétique, en fonction de laquelle on souligne l'élégance et la simplicité des règles régissant le monde et des théories le décrivant ;
- La dimension éthique : les données étant importantes, certains plaident pour protéger la *privacy*, d'autres la considèrent comme un problème dépassé ou dépassable ;
- La dimension métaphysique, selon laquelle le monde est un réseau de réseaux interconnectés et en communication constante et immédiate ; un monde déterministe et sans libre arbitre, ou avec un libre arbitre très limité par les contraintes physiques ;
- La dimension cosmologique, qui dit que le cosmos calcule de l'information selon des algorithmes ou même que l'univers est un ordinateur ;
- La dimension politique qui, à partir du constat de l'avalanche de données, affirme qu'il faut pouvoir collecter beaucoup de données, nécessairement utiles socialement ; émergent ainsi des promoteurs du commerce des données, qui s'opposent aux défenseurs de l'*open data* ; certains préféreront garder un pouvoir centralisateur étatique, d'autres seront fascinés par la « futarchie »[2365] ;
- Et enfin la dimension économique, qui établit que des flux rapides et innovants, dématérialisés, caractérisent le monde ; un monde capitaliste, plutôt néolibéral, où les grands *hubs* mangent inévitablement les petits nœuds ; ou un monde capitaliste, plutôt anarcho-libéral, où la décentralisation, l'horizontalité et l'autonomie des individus-souverains créent plus de justice sociale, de redistribution des richesses et de respect de l'environnement.

***

Une série d'auteurs ont critiqué la métaphysique computationnelle et la société de la communication à partir de points de vue différents. Nous reportons (et partageons) ces réflexions éclairantes dans ce qui suit avec des brefs commentaires.

Les philosophes Giuseppe Longo et Paul-Antoine Miquel et les biologistes Carlos Sonnenschein et Ana María Soto ont écrit un article de philosophie de la biologie dans lequel ils attaquent la métaphore informationnelle, devenue métaphysique, pour rendre compte du fonctionnement de la vie[2366]. Le cadre de raisonnement digital donne à penser en termes de structures discrètes (les molécules d'ADN), ce qui dessaisit les interactions internes et externes aux organismes de tout pouvoir causal sur

[2365] Système politique conçu par l'économiste Robin Hanson, la futarchie consiste à ajouter à la démocratie le principe selon lequel, quand un marché de prédictions estime qu'une certaine décision est susceptible d'augmenter la richesse collective, telle décision devient une loi. Il s'agit d'une méthode qui a été employée dans de grandes entreprises, telles que Google, Yahoo ou Microsoft.

[2366] Longo, G., Miquel, P.-A., Sonnenschein, C. & Soto, A.M., « Is information a proper observable for biological organization ? », *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2012, n. 109, pp. 108-114.

l'organisation du vivant. Les auteurs reprennent les théoriciens de l'information (Shannon, Turing, Schrödinger, Gödel, etc.) et, en tirant les fils logiques de leurs théories en les appliquant au biologique, soulignent comment les conclusions sont en contradiction avec les données empiriques disponibles sur les cellules :

> « In the classic information theoretical context, causation follows a bottom-up direction : digits as elementary and simple components, *completely determine* information ; if this concept of information is applied to biology it would bring with it a bottom-up, Laplacian structure of determination operating from DNA to biological forms or phenotypes. Instead, we posit that there is no privileged causal level in biology. […] Biological organization is not determined by bottom-up interactions of discrete molecular components, but by complex causal networks, including *simultaneous* bottom-up *and* top-down causality »[2367].

Si on abandonne les sciences de la vie et qu'on aborde les humanités numériques, les critiques sont semblables. Le sociologue Sébastien Broca est l'auteur d'un article critique de ce qu'il appelle l'« imaginaire des 'SHS 2.0' » : contre l'idée selon laquelle l'informatique serait devenue indispensable à comprendre le social et que cela se ferait « au service » des SHS, il oppose que « [l]es outils numériques ne sont pas 'neutres'. Ils sont solidaires de pratiques spécifiques et emportent avec eux des manières de se rapporter au monde et de concevoir la connaissance »[2368]. Il mène son analyse en s'appuyant sur la philosophie de Cornelius Castoriadis, qui distinguait entre la dimension « ensembliste-identitaire » – qui se réfère à la formalisation, à la quantification et au calcul, à la logique et au déterminé – et la dimension de l'« imaginaire » – mode d'être propre au monde social-historique, la sphère du mythe, de l'idéologie, bref l'ensemble des significations qui font tenir une société. Or, selon Broca la spécificité des SHS est de se pencher sur l'étude de la dimension de l'imaginaire ; toutefois, selon lui, l'informatique n'a pas qu'une dimension ensembliste-identitaire, elle a aussi une dimension de l'imaginaire qu'il convient d'expliciter ; enfin, le procédé digital est porteur d'un appauvrissement du signe :

> « La rationalité algorithmique de l'ordinateur est donc susceptible de produire des données inédites, dont la nouveauté *relative* – car déterminée par les éléments combinés et les règles de calcul suivies – servira parfois d'appui pour la création de nouvelles significations. […] L'informatique n'implique donc pas qu'une éclipse de la signification, elle en est parfois (bien que pas toujours) un appauvrissement durable »[2369].

[2367] *Ibid.*, p. 113.
[2368] Broca, S., « Épistémologie du code et imaginaire des 'SHS 2.0' », *Variations*, 2016, n. 19, p. 2, consulté le 30 septembre 2016 : https://journals.openedition.org/variations/701.
[2369] *Ibid.*, p. 9.

En se basant sur l'historien de l'ordinateur Philippe Breton, Broca caractérise l'imaginaire de l'informatique comme étant basé sur trois points :

> « L'épistémologie du code, ce sont aussi les attitudes face à l'informatique et au savoir de ceux qui écrivent et utilisent des logiciels. Ce deuxième aspect renvoie à ce que nous appelons, après d'autres, l'*imaginaire de l'informatique.* Philippe Breton a décrit cet imaginaire comme organisé autour de trois idées[2370] : la 'vision d'une société future radicalement transformée' par l'informatique, la 'comparaison entre le cerveau et l'ordinateur', la conviction que 'la logique est une valeur universelle, un outil de compréhension du monde autant qu'un moyen de le transformer' »[2371].

Broca conclut son travail en s'appuyant sur Bruno Bachimont et Marta Nussbaum pour revendiquer la spécificité des SHS face à l'impérialisme de l'informatique (dont par ailleurs ni Broca ni nous-mêmes ne mettons en doute l'utilité) :

> « Afin de résister aux tentations impérialistes de l'épistémologie du code, il convient par conséquent de défendre la légitimité de 'stratégies rationnelles non computationnelles'[2372] […] ce par quoi l'on entendra essentiellement deux choses : l'argumentation et la narration. L'argumentation est ce qui empêche de réduire le travail des sciences humaines à un gigantesque *problem solving […]* La narration est ce 'qui éveille et affine la capacité à voir le monde à travers les yeux d'autrui' »[2373].

L'enseignant de communication et journaliste Yves de la Haye est l'un des premiers à avoir critiqué la vision en réseaux dans une série d'essais journalistiques, collectés au milieu des années 1980 dans un livre intitulé *Dissonances. Critique de la communication*. De la Haye y a fustigé l'aspect dépolitisant et irénique du langage de ce qu'il appelle l'« idéologie communicationnelle »[2374], en prenant souvent pour cible les représentants de ce que nous avons appelé, dans le Prologue, *tradition cybersystémique* :

> « Henri Laborit et Joël de Rosnay de leur côté ont fait franchir allègrement les barrières entre l'organisme vivant et le socius. La société informationnelle

[2370] Breton, P., *Une histoire de l'informatique,* Paris, Seuil, 1990, p. 157.
[2371] Broca, S., « Épistémologie du code et imaginaire des 'SHS 2.0' », *op. cit.*, p. 9.
[2372] Bachimont, B., « Signes formels et computation numérique : entre intuition et formalisme. Critique de la raison computationnelle », 2004, http://www.utc.fr/~bachimon/Publications_attachments/Bachimont.pdf.
[2373] Nussbaum, M.C., *Les émotions démocratiques. Comment former le citoyen du XXIe siècle*, Paris, Flammarion, 2011, p. 121.
[2374] Haye, Y. de la, *Dissonances. Critique de la communication*, Grenoble, La Pensée Sauvage, 1984, p. 169.

> acquerrait peu à peu le statut d'une évidence. On ne parle plus – ou plus seulement ou plus principalement – d'exploitation, de domination, d'aliénation mais de désordre, de bruit et d'entropie. La société, c'est un ensemble de réseaux innervé par des informations »[2375].

Dans un essai contenu dans le livre et intitulé « Pour une critique de l'idéologie informatique », de la Haye décrit la « société programmée » comme un « réseau de communications sans sujets »[2376]. Selon cet auteur, le vocabulaire de la cybernétique, de la systémique, de la théorie de l'information et de la biologie moléculaire

> « autorise […] tous les glissements sémantiques et les généralisations abusives. Son effet le plus clair est de donner à voir la communication comme une activité sociale autonome, ayant sa consistance propre, c'est-à-dire sans rapports directs avec les pouvoirs, les intérêts de classes, les conflits, les profits et les marchés »[2377].

Dans cette optique, les ingénieurs, les politiques et les entrepreneurs rêveraient d'une « utopie communicationnelle », la promesse consistant à voir les « machines comme autant de moyens d'émancipation, d'enrichissement social et personnel ! »[2378]. Selon de la Haye, derrière le vœu d'une structure sociopolitique plus horizontale et démocratique, décentralisée et coordonnée, se cachait « l'effort conjugué de l'État et de quelques grands groupes industriels pour occuper deux ou trois créneaux dans le marché mondial de la télématique »[2379]. Cet auteur concluait que la construction d'un « homo communicans » était « une fausse réponse technocratique à une vraie question politique, sociale et culturelle »[2380]. Il dénonçait l'anthropologie déshumanisante des ingénieurs en communications et des experts en prospective sociale, qui selon lui pensaient que

> « une société est avant tout un maillage de réseaux où circulent des informations, un ensemble de terminaux d'où partent des appels – ordres, programmes, questions – et où se distribuent des réponses, une architecture de commutateurs où s'opèrent les connexions, les réembranchements, les décrochages ; en bref une sorte de super-organisme dans lequel la cellule 'être-humain' munie d'une raison analytique zéro-un se définirait par la quantité d'informations qu'elle donne et qu'elle reçoit »[2381].

[2375] *Ibid.*, p. 127.
[2376] *Ibid.*, p. 165.
[2377] *Ibid.*, p. 169.
[2378] *Ibid.*, p. 165.
[2379] *Ibid.*, p. 166.
[2380] *Ibid.*, p. 167.
[2381] *Ibid.*, p. 168.

Le rêve d'un monde constitué de machines pour la gestion de tous les aspects fondamentaux de la vie (compte en banque, santé, éducation, loisirs, etc.), machines vendues comme libératrices, c'est selon de la Haye un rêve qui « correspond à la paranoïa du cadre supérieur pressé, méthodique, toujours à la recherche d'une meilleure organisation cependant, et qui, surtout, n'attend de la société que des services »[2382].
Le juriste Alain Supiot, dans une veine similaire, affirme que

> «[c]et imaginaire cybernétique conduit à penser la normativité non plus en termes de législation mais en termes de programmation. On n'attend plus des hommes qu'ils agissent librement dans le cadre des bornes que la loi leur fixe, mais qu'ils réagissent en temps réel aux multiples signaux qui leur parviennent pour atteindre les objectifs qui leur sont assignés »[2383].

À la vision apocalyptique d'Yves de la Haye et d'Alain Supiot, explicitement axée sur des aspects sociaux, économiques et politiques, fait de pendant la thèse plus nettement métaphysique de la critique littéraire Katherine Hayles. Cette chercheuse regrette les effets anthropologiques profonds qui résultent du fait que l'« information a perdu son corps » : « When information loses its body, equating humans and computers is especially easy, for the materiality in which the thinking mind is instantiated appears incidental to its essential nature »[2384]. Hayles qualifie la nouvelle anthropologie, issue de la culture cybernétique, de « post-humaine » :

> « First, the posthuman view privileges informational pattern over material instantiation […] Second, the posthuman view considers consciousness […] as an epiphenomenon […] Third, the posthuman view thinks of the body as the original prosthesis we all learn to manipulate […] Fourth […] the posthuman view configures human being so that it can be seamlessly articulated with intelligent machines »[2385].

Ce que nous avons appelé métaphysique computationnelle prend, chez Hayles, le nom de « virtualité » : « Virtuality is the cultural perception that material objects are interpenetrated by information patterns »[2386]. Mais le problème n'est même pas l'interpénétration, le problème est la hiérarchie que le mode de la virtualité instaure dans le rapport entre matière et information :

[2382] *Ibid.*, p. 169.
[2383] Supiot, A., *La Gouvernance par les nombres. Cours au Collège de France (2012-2014)*, Paris, Fayard, 2015, p. 23.
[2384] Hayles, K.N., *How We Became Posthuman. Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago & London, The University of Chicago Press, 1999, p. 2.
[2385] *Ibid.*, pp. 2-3.
[2386] *Ibid.*, pp. 12-13.

> « the impression is created that pattern is predominant over presence. From here it is a small step to perceiving information as more mobile, more important, more essential than material forms. When this impression becomes part of your cultural mindset, you have entered the condition of virtuality »[2387].

Pour Hayles le problème est cosmogonique : elle ne conteste pas l'activité d'abstraction de la démarche informationnelle, car il s'agit d'une opération typique de tout travail théorique :

> « The Platonic backhand works by inferring from the world's noisy multiplicity a simplified abstraction. So far so good : this is what theorizing should do. The problem comes when the move circles around to constitute the abstraction as the originary form from which the world's multiplicity derives »[2388].

Elle conteste plutôt le fait de considérer l'abstrait comme le point de départ du réel, amenant à une vision du monde platonicienne :

> « The backhand goes from noisy multiplicity to reductive simplicity, whereas the forehand swings from simplicity to multiplicity. They share a common ideology – privileging the abstract as the Real and downplaying the importance of material instantiation. When they work together, they lay the groundwork for a new variation on an ancient game, in which disembodied information becomes the ultimate Platonic Form »[2389].

D'autres auteurs, à partir d'autres points de vue disciplinaires et critiques, ont mené des analyses similaires autour de la raison digitale. Il nous faut suspendre ce moment particulier de notre enquête, en soulignant l'importance d'une forme de *vigilance épistémique, métaphysique et politique* à propos de la métaphore computationnelle – vigilance que les représentants des SHS et les scientifiques numériques devraient, à notre avis, développer plus ouvertement. Éviter les conséquences néfastes d'une emprise de l'imaginaire numérique ne signifie pas se priver des avantages et des apports des mondes digitaux pour la vie pratique comme pour la vie académique.

Conclusion

[2387] *Ibid.*, p. 19.
[2388] *Ibid.*, p. 12.
[2389] *Ibid.*, p. 13.

Nous n'avons pas voulu soutenir ici que tout usage de l'outil numérique serait par définition réducteur de l'anthropologie humaine. Des scientifiques computationnels, par exemple issus des SSC sont porteurs de positions différentes de celles que nous avons critiquées dans ce chapitre. Ce que nous avons souhaité faire ici, c'est prendre position par rapport à l'ontologie digitale, en ce qu'elle produit comme conséquences en termes à la fois épistémiques, métaphysiques et politiques.
Nous ne sommes pas *agnostique* : suivant notre propre classification idéal-typique du chapitre 13, affirmons une préférence pour l'approche *dualiste*, c'est-à-dire à la fois matérialiste et pragmatiste, constructiviste et réaliste. Nous ne pensons pas, contrairement au philosophe Michel Morange[2390], que la matière est uniquement passive, uniquement *cause efficiente*, mais que, pour utiliser encore les termes aristotéliciens, la *cause matérielle*, la *cause formelle* et la *cause efficiente* sont toujours à l'œuvre, toujours inséparables dans les faits. Nous avons tâché de critiquer ce que Francis Chateauraynaud appelle l'*axiomatique autonome*, qui dans son dernier ouvrage publié avec Josquin Debaz est définie ainsi :

> « Une axiomatique autonome permet d'engendrer des actions et des jugements qui n'ont plus de compte à rendre à la réalité, du fait de l'hyper-cohérence interne qui rend inutile, pragmatiquement, tout effort de recoupement. Le jeu d'échec est un bel exemple de ce type d'axiomatique vers lequel tend tout système formel »[2391].

Dans un article récent, Francis Chateauraynaud, qui s'est associé à la sociologue Cathy Dubois, redéveloppe cette idée d'*axiomatique autonome*, en la confrontant à deux autres régimes : le *régime conventionnaliste*, qui doit reposer sur des ontologies partagées pour qu'une preuve soit établie[2392], et le *régime phénoménologique*, qui s'appuie sur les expériences et les prises communes[2393]. Il s'agit ainsi de voir les sciences du climat comme des sciences sociales potentielles, capables de sortir du *régime de l'axiomatique autonome*, qui « dépend de la production d'un système formel et se déduit d'un espace de calcul », et dans lequel l'axiomatique « peut être automatisée ». De manière semblable, nous voulons suggérer que les SSC devraient sortir du cadre de l'*axiomatique autonome* et automatisée, pour rentrer dans le *régime*

[2390] Morange, M., *Une histoire de la biologie*, Paris, Seuil, 2016.
[2391] Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible*, *op. cit.*, p. 588.
[2392] « Pour fournir des preuves statistiques, par exemple, on doit construire des ensembles (des populations) et des descripteurs (des variables), autant d'outils de caractérisation qui n'échappent qu'exceptionnellement au flou des catégories et de leurs frontières toujours liées à un *travail sémantique*, lui-même dépendant de luttes définitionnelles » : Chateauraynaud, F. & Dubois, C., « Et si la climatologie devenait une science sociale comme les autres ? À propos du colloque 'Entre connaissance et action : regards croisés sur les enjeux climatiques et environnementaux' (Paris, décembre 2016) », à paraître dans *Nature, Sciences, Sociétés*, version révise du 12.05.18.
[2393] « C'est ce régime que pratiquent spontanément les sciences sociales lorsqu'elles prennent appui sur les expériences du monde et sur les formes d'intercompréhension, les prises communes, qu'elles rendent possibles. On parlera aussi bien de régime pragmatique ou écologique de la preuve » : Chateauraynaud, F. & Dubois, C., « Et si la climatologie devenait une science sociale comme les autres ? », *op. cit.*

phénoménologique à l'aune des sciences sociales. Cela pour respecter précisément cette complexité dont elles portent le nom…
Afin d'éclairer ce point, nous trouvons efficace la distinction analytique et la proposition normative que l'un de nos interviewés du CREA, le mathématicien et philosophe Alessandro Sarti, a défendu en s'appuyant sur René Thom :

> « Thom dit : il y a deux formes intéressantes, les formes saillantes et les formes prégnantes. Les formes saillantes sont les formes du monde, la forme d'une ville, des objets que je vois, etc. Les formes prégnantes sont liées aux grands principes de la régulation biologique, comme la sexualité, l'agressivité, la coopération, la faim, la douleur. C'est-à-dire les formes du corps, de l'affect. Et il dit : attention lorsqu'il s'agit de systèmes humains, il dit qu'en général tous les systèmes intelligibles […] doivent toujours être décrits en termes de la relation entre leurs saillances et leurs prégnances, c'est-à-dire qu'est-ce que cette forme signifie pour moi ? [...] Les formes saillantes sont les signifiants et les formes prégnantes sont les signifiés. […] Donc le grand risque de la modélisation aujourd'hui des systèmes complexes dans les sciences sociales, c'est de traiter les systèmes de sens, qui sont les systèmes humains, comme des systèmes de vérité, seulement comme des systèmes de saillance, abstraits »[2394].

En conclusion, nous voudrions faire nôtre une séquence offerte par Katherine Hayles qui, après avoir critiqué la vision de l'humain post-humain, propose sa propre vision anthropologique et avance un plaidoyer matérialiste :

> « If my nightmare is a culture inhabited by posthumans who regard their bodies as fashion accessories rather than the ground of being, my dream is a version of the posthuman that embraces the possibilities of information technologies without being seduced by fantasies of unlimited power and disembodied immortality, that recognizes and celebrates finitude as a condition of human being, and that understands human life is embedded in a material world of great complexity, one on which we depend for our continued survival »[2395].

[2394] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
[2395] Hayles, K.N., *How We Became Posthuman, op. cit.*, p. 5.

Acte 3 – L’ordinateur et le (néo)libéralisme

Les engagements épistémiques des spécialistes des systèmes complexes. Le cas de la géographie quantitative et de l'épidémiologie computationnelle

Introduction

D'après nombre d'historiens et sociologues, un processus de « néolibéralisation » de tout un ensemble de secteurs de la société est à l'œuvre depuis les années 1980. De fait, dans différents domaines des technosciences[2396], de l'université[2397], ou des services associés à des biens communs[2398], le déploiement d'une logique marchande concourant à privatiser les domaines publics et privilégiant l'autorégulation des marchés, les décisions étant présentées comme orientées par l'amélioration de la qualité de vie, du bien-être et de l'efficience de la société.
Le sociologue Lawrence Busch définit le néolibéralisme comme le croisement d'une école de pensée de l'économie, d'un programme d'action gouvernemental et d'une idéologie politique[2399]. Mais cette entité multiple n'est pas seulement composée de discours, d'agencements économiques ou de politiques. Elle opère et se manifeste aussi par le biais d'un certain type de savoirs et de techniques. Dans tout cela, la digitalisation du monde est souvent vue comme une manifestation du processus de conquête de nouveaux marchés, de disparition graduelle des frontières et de fluidification de la circulation des capitaux, des marchandises et des personnes. Une idée répandue voit dans la réorganisation computationnelle du monde un processus accompagnant le déploiement de la dernière phase du capitalisme globalisé.

L'ordinateur, le meilleur allié du néolibéralisme ?

Par exemple, dans un article de 2001 commentant *Empire* de Michael Hardt et Antonio Negri[2400], le philosophe Slavoj Žižek voit dans le capitalisme postindustriel et digitalisé la réalisation complète de la définition marxiste du capitalisme ; pour lui le cybercapitalisme incarne le paradigme même du capitalisme tout court[2401]. L'auteur slovène condense cette thèse dans une image efficace, où la physique sur laquelle repose le numérique représente métaphoriquement le mode de fonctionnement de ce

[2396] Pestre, D. (ed.), *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*, Paris, La Découverte, 2014 ; Rajan, K.S., *Biocapital. The Constitution of Postgenomic Life*, Durham & London, Duke University Press, 2006.
[2397] Moore, K., Kleinman, D.L., Hess, D. & Frickel, S., « Science and neoliberal globalization: a political sociological approach », *Theory and Society*, vol. 40, n. 5, pp. 505-532 ; Rhoades, G. & Slaughter, S., « Academic capitalism in the new economy », *op. cit.*
[2398] Dardot, P. & Laval, C., *Commun. Essai sur la révolution au XXIème siècle*, Paris, La Découverte, 2014 ; Coriat, B. (ed.), *Le Retour des communs. La crise de l'idéologie propriétaire*, Paris, Les Liens qui libèrent, 2015.
[2399] Busch, L., *Le marché aux connaissances*, *op. cit.*, p. 17.
[2400] Hardt, M. & Negri, A., *Empire*, Paris, Exils, 2000.
[2401] Žižek, S., « Have Michael Hardt and Antonio Negri Rewritten the Communist Manifesto for the Twenty-First Century ? », *Rethinking Marxism*, 2001, vol. 13, n. 3-4, pp. 190-198.

type de système économique : là où l'électron n'a pas de masse et en acquière de par son mouvement rapide, le capitalisme d'aujourd'hui n'a plus de masse (i.e. plus de propriété directe des moyens de production matériels) mais, de par son mouvement rapide, il réussit selon Žižek à exercer beaucoup d'effets de pouvoir, peut-être plus que jamais.

Dans un livre publié deux ans auparavant, en 1999, l'historien américain Dan Schiller s'attèle à déconstruire la grande promesse, qu'il qualifie de millénariste, qui voit dans le monde en réseau la solution à tous les maux de l'humanité, pouvant apporter des améliorations au domaine de l'éducation, à celui de l'économie, comme à celui de la démocratie[2402]. En réalité, d'après cet auteur, « [à] travers leur largeur et leur profondeur, les réseaux d'ordinateurs se connectent avec le capitalisme existant pour élargir massivement la portée effective du marché »[2403]. Selon l'historien de l'économie Richard DuBoff, que Schiller cite dans son livre, bien que le capitalisme ait toujours été international, la globalisation digitalisée implique une internationalisation des flux financiers et économiques beaucoup plus intégrée et contraignante pour les politiques des États-Nation. Schiller considère le processus de digitalisation du monde comme « l'angle d'attaque d'une telle transnationalisation épique de l'activité économique »[2404]. Dans sa perspective, les « [r]éseaux sont en train de généraliser directement l'étendue sociale et culturelle de l'économie capitaliste comme jamais auparavant », d'où sa formule de « capitalisme digital »[2405].

Si on remonte encore trois ans en arrière, dès 1996 le sociologue Manuel Castells publiait en anglais son classique *La société en réseau*, où il soutenait déjà la thèse de cette alliance entre société de l'information et capitalisme : « La révolution de la technologie de l'information joue un rôle majeur dans la mise en œuvre, depuis les années 1980, du processus fondamental de restructuration du système capitaliste »[2406]. Pour l'auteur espagnol, l'analyse devait porter sur la nouvelle structure sociale que le mode de développement appelé « informationnalisme » avait contribué à mettre en place, en parallèle d'une restructuration du mode de production capitaliste. La qualification de « capitalisme informationnel » s'impose ainsi, selon Castells, pour caractériser le nouveau système[2407]. Selon sa lecture, l'omniprésence des technologies de l'information (car elles agissent sur tous les domaines de l'activité humaine), leur logique en réseau, ainsi que leur souplesse, créent un « espace de flux »[2408] (en

[2402] Schiller, D., *Digital Capitalism*, *op. cit.*
[2403] *Ibid.*, p. XIV.
[2404] *Ibid.*
[2405] *Ibid.*
[2406] Castells, M., *La société en réseau*, *op. cit.*, p. 34.
[2407] *Ibid.*, p. 40.
[2408] « Je pense, écrit plus en détail Castells, qu'il existe une forme spatiale nouvelle caractéristique des pratiques sociales qui dominent et façonnent la société en réseau : l'espace des flux. *L'espace des flux est l'organisation matérielle des pratiques sociales du temps partagé qui s'effectuent au travers de flux*. Par 'flux', j'entends des séries significatives, répétitives et programmables d'échanges et d'interactions entre des positions

opposition dialectique avec l'« espace de lieux » traditionnel), dans lequel « la productivité naît et la concurrence s'exprime dans un réseau global d'interaction »[2409], qui de par son organisation sociale et technique « sert mieux la flexibilité et l'adaptabilité »[2410].
Dans un livre sur les cultures numériques, le « massmédiologue » anglais Charlie Gere voit un lien d'affinité profond entre la théorie cybernétique et l'économie néolibérale :

> « The rhetoric of neo-liberalism also continually emphasizes the extraordinary abilities of computers and networks to enable the managing of complex interlinked markets. But the affinities between neo-liberalism and technology run deeper. Like Adam Smith's market system […] neo-liberal economics instantiate a kind of cybernetic fantasy of self-regulation »[2411].

Le sociologue Frank Webster donne, pour sa part, la liste des noms qui ont été proposés pour définir cette nouvelle configuration sociotechnique : « économie sans poids », « économie de l'information globale », « société de l'information » et « société en réseau » sont seulement quelques exemples[2412].
Toute cette littérature, dont on pourrait multiplier les exemples (surtout en y incluant les publications grand-public[2413]), a semé l'idée générale selon laquelle il y aurait, plus qu'une affinité élective entre digitalisation du monde et capitalisme, une sorte de liaison ontologique nécessaire. En réalité, si on sort de l'optique du déterminisme techn(olog)ique dans laquelle ces positions tombent souvent (« From this perspective, écrit Schiller, cyberspace not only exemplifies but today actually shapes the greater political economy of which it has become a critical part »[2414]), on peut facilement reconnaître que les objets techniques ne suffisent pas, à eux seuls, pour refaçonner le monde. Et surtout qu'ils n'ont pas qu'un seul usage, tel que des enzymes dont le site actif accepterait un seul type de substrat. En délaissant la métaphore biologique, il est banal que de dire que les technologies peuvent être réappropriées et inscrites dans plusieurs contextes culturels, idéologiques, économiques différents. Aussi banal en sociologie des sciences que rarement évoqué dans les milieux scientifiques, politiques, managériaux et médiatiques, ce constat mérite d'être répété à propos des sciences de la complexité.

---

géographiquement éloignées occupées par des acteurs sociaux dans les structures économiques, politiques et symboliques de la société » : *ibid.*, p. 463.
[2409] *Ibid.*, p. 93.
[2410] *Ibid.*, p. 434.
[2411] Gere, C., *Digital Culture*, *op. cit.*, p. 144.
[2412] Webster, F., *Theories of the information society*, Londres & New York, Routledge, 2006, p. 2.
[2413] Par exemple, Mayer-Schönberger, V. & Ramge, T., *Reinventing Capitalism in the Age of Big Data*, New York, Basic Books, 2018.
[2414] Schiller, D., *Digital Capitalism*, *op. cit.*, p. XVI.

Les SSC, le meilleur allié du néolibéralisme ?

Dans le cas des SSC, la liaison capital-numérique est constituée. Ce n'est pas un hasard si Castells, après avoir cité dans son premier chapitre la théorie du chaos et la mouvance du SFI, considère que la « globalité », la « complexité » et la « mise en réseau » sont les qualités majeures du paradigme des technologies de l'information, supposées s'adapter et s'ouvrir au monde en évolution perpétuelle[2415]. Il est en effet habituel de lire ou d'écouter des chercheurs et des chercheuses en SHS – de la sociologie à l'économie –, assimilant le concept de « systèmes complexes » à la vision hayékenne de la société, en décrivant la « théorie de la complexité »[2416] comme une sorte de légitimation scientifique de la théorie de l'autorégulation et de l'auto-organisation des marchés. Autrement dit, l'idée est assez répandue qu'il y aurait une proximité épistémique et axiologique constante entre les SSC et ce courant de l'économie devenu aujourd'hui hégémonique.

En soi, cette idée est bien fondée, car, à la suite d'une recherche bibliographique même superficielle, on trouve une pléthore de textes qui lient les deux domaines d'une manière ou d'une autre. Des membres du SFI ou des chercheurs proches des SSC françaises, et non des moindres, se réfèrent à Hayek, comme Robert Axtell[2417], Stuart Kauffman[2418], Brian Arthur[2419] ou Jean Petitot[2420] ; on voit également que des économistes proposent des rapprochements entre ce dernier domaine et le corpus théorique de l'intellectuel autrichien ainsi que celui d'autres représentants de ce courant qui est souvent appelé « économie évolutionniste ». Par exemple, le politiste américain Henry Kilpatrick voit des points de contact entre les deux corpus et invite les représentants des SSC à approfondir l'œuvre de von Hayek en particulier[2421]. L'économiste australien John Foster propose ensuite de connecter la littérature sur les réseaux complexes au courant économique évolutionniste, représenté pour lui par Hayek, Herbert Simon, Gunnar Myrdal, Joseph Schumpeter et même le décroissant Nicholas Georgescu-Roegen[2422]. L'économiste britannique Sheri Markose, experte de MBA, soutient que les SSC permettent de répondre à bon nombre de questions

[2415] Castells, M., *La société en réseau*, *op. cit.*, pp. 90-91.

[2416] Cette expression de « théorie de la complexité » est problématique, car parfois avec cela les auteurs se réfèrent au SFI, parfois à la fois à Hayek et au SFI. Comme nous l'avons montré dans le premier chapitre de cette thèse, une approche par traditions identifiées par leur *horizon de rétrospection* clarifie les usages de ces termes, pour les remplacer par des formules analytiques plus claires et non-ambigües. En l'occurrence, Hayek se réfère surtout à la *tradition cybersystémique*.

[2417] Axtell, R.L., « Hayek Enriched by Complexity Enriched by Hayek », *Advances in Austrian Economics*, 2016, vol. 21, pp. 63-121.

[2418] Kauffman, S. *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, New York, Oxford University Press, 1995, pp. 247-262.

[2419] Tucker, W., « Complex questions : the new science of spontaneous order », *Reason*, 1 January, 1996.

[2420] Petitot, J., « Complex Methodological Individualism », *Cosmos + Taxis*, 2016, vol. 3, n. 2+3, pp. 27-37.

[2421] Kilpatrick, H.E., « Complexity, Spontaneous Ordrer, and Friedrich Hayek : Are Spontaneous Order and Complexity Essentially the Same Thing ? », *Complexity*, 2001, vol. 6, n. 3, pp. 16-20.

[2422] Foster, J., « From simplistic to complex systems in economics », *Cambridge Journal of Economics*, 2005, n. 29, pp. 873-892.

économiques restées jusqu'ici sans solution[2423]. Nicolaas Vriend, autre économiste usager des MBA, suggère de manière provocatrice que Hayek était un économiste computationnel basé sur agents (ou ACE) avant la lettre[2424]. Tandis que Greg Fisher sur le blog *Synthesis*[2425] et les auteurs d'un manuel collectif sur la complexité de l'économie[2426] décrivent les ressemblances et les différences entre les deux ensembles théoriques pour en proposer, eux aussi, des rapprochements jugés potentiellement féconds. Mais encore, David Pearce pense que les SSC renforcent les arguments contre la planification gouvernementale et ne font que ré-découvrir la « théorie de la complexité » de Hayek[2427], ce qui est une position similaire à celle de Karen Vaughn, qui voit l'économiste autrichien comme le précurseur des SSC[2428]. Enfin, Kevin Kelly, éditeur exécutif de la fameuse revue mensuelle techno-utopiste *Wired*, a écrit un livre grand public, intitulé *Out of Control*, qui utilise les sciences de la complexité pour décrire, promouvoir et justifier scientifiquement un monde néolibéral[2429], basé sur la *New Economy* ou économie numérique[2430].

Tout cela, et bien d'autres éléments empiriques, rendent compréhensible l'idée d'une proximité, voire d'une identité épistémique et idéologique entre les travaux sur les systèmes complexes et le courant (néo)libéral. Un passage tiré d'un chapitre écrit par deux historiens des sciences, Yannick Mahrane et Christophe Bonneuil, illustre bien cette thèse. Selon ces chercheurs, les savoirs issus de la Seconde Guerre (notamment la cybernétique et la recherche opérationnelle), ainsi que les modes de gouvernement inaugurés par Ronald Reagan aux États-Unis, ont transformé la biosphère en une marchandise aussi complexe et adaptative que les marchés sur lesquels les services écosystémiques sont vendus :

> « Cet environnementalisme de marché, incubé aux États-Unis avant de s'imposer dans les arènes internationales, s'articule à un nouveau régime de savoir-pouvoir sur le vivant cherchant à redéfinir les systèmes socio-économiques et naturels comme des systèmes complexes, adaptatifs, soumis à des perturbations constantes, exigeant une reconfiguration des institutions en charge de la gestion environnementale et une extension des mécanismes du marché jugés plus flexibles et cognitivement

[2423] Markose, S.M., « Computability and evolutionary complexity : markets as complex adaptive systems », *The Economic Journal*, 2005, n. 115, pp. 159-192.
[2424] Vriend, N.J., « Was Hayek an ACE ? », *Queen Mary and Westfield College Working Paper No. 403*, 1999 : https://ssrn.com/abstract=185650.
[2425] Fisher, G., « The Complexity of Hayek », *Synthesis*, 10.02.2012 : http://www.synthesisips.net/blog/the-complexity-of-hayek/.
[2426] Rosser, J.B. (ed.), *Handbook of Research of Complexity*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, 2009.
[2427] Pearce, D., « Complexity Theory and Economics », *Agenda*, 1994, vol. 1, n. 1, pp. 101-110.
[2428] Vaughn, K.I., « Hayek's theory of the market order as an instance of the theory of complex, adaptive systems », 1999, vol. 9, n. 2-3, pp. 241-256.
[2429] Kelly, K., *Out of Control. The New Biology of Machines, Social Systems, and the Economic World*, New York, Addison-Wesley, 1994.
[2430] Turner, F., *From counterculture to cyberculture. Stewart Brand, the Whole Earth Network, and the rise of digital utopianism*, Chicago, University of Chicago Press, 2006.

supérieurs. Par le développement de représentations de la nature et de savoirs économiques formalisés durant la guerre froide visant à démontrer la supériorité des économies de marché sur les économies planifiées et à limiter l'intervention gouvernementale dans le champ de l'économie, un nouveau régime de gouvernementalité néolibérale de l'environnement s'est ainsi progressivement établi »[2431].

Nous avons vu dans le Prologue que les SSC ne se réfèrent pas en premier lieu à la cybernétique et à la recherche opérationnelle, mais la référence de Mahrane et Bonneuil aux « systèmes complexes adaptatifs » fait une claire allusion au courant initié par le SFI. Et à la lumière des sources bibliographiques que nous venons de citer, l'association du courant néolibéral aux SSC apparaît donc légitime.
Cependant, notre travail de terrain fait apparaître une situation bien plus multidimensionnelle. Des visions différentes, voire contraires à la forme (néo)libérale, coexistent à l'intérieur des SSC. Il ne s'agit pas de nier ou de contrecarrer la validité de la thèse selon laquelle le numérique et le capitalisme s'allient de plusieurs manières à des fins hégémoniques. D'abord parce que de multiples auteurs ont collecté des tas d'évidences en appui à cette thèse et, ensuite, parce qu'une partie de notre propre matériau la fortifie. Cependant, ce serait une erreur de voir une connexion nécessaire et automatique entre le digital et le capitalisme. De même, il serait réducteur de faire des SSC de simples servants du capitalisme néolibéral, comme le fait notre interviewé du CREA Alessandro Sarti, quand il affirme que ce domaine, caractérisé par de techniques performantes, ne serait rien d'autre que « l'ossature de ce qu'on pourrait appeler technocapitalisme », puisque c'est un domaine qui selon lui s'est « intégré de manière un peu acritique […] à un système de capital »[2432]. Ce chapitre va quelque peu complexifier la vision de l'entrelacs entre mondes numériques, savoirs et capitalisme, à travers des exemples précis de chercheurs et chercheuses se réclamant des SSC. En effet, nous allons montrer que les systèmes complexes peuvent être associés à la vision d'une société plate, concurrentielle et innovante, mais aussi à une conception de l'État comme une supra-entité, forte et centralisée, ou encore à une vision où les éléments du système complexe ne sont pas dépourvus d'une connaissance globale du système auquel ils appartiennent, comme le croyait Hayek, mais sont décrits comme des « acteurs » réflexifs qui agissent localement pour affecter délibérément le global.
À partir de plusieurs travaux de terrain menés en France, aux États-Unis et en Italie sur des équipes de géographie quantitative et d'épidémiologie computationnelle s'inscrivant dans les sciences de la complexité, ce chapitre repère, décrit et analyse trois types d'*engagements épistémiques*, se concrétisant en autant de *communautés d'anticipation*. Ces deux concepts sont particulièrement investis par la sociologue

[2431] Pestre, D. (ed.), *Le gouvernement des technosciences*, *op. cit.*, p. 163.
[2432] Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.

Céline Granjou, spécialiste des sciences de la biodiversité. Le premier, construit avec Isabelle Arpin à partir de la notion de *communauté épistémique* de Peter Haas[2433], décrit « le travail de recherche *en tant qu'*engagement éthique et politique tourné vers la production d'un certain type de connaissances »[2434]. Il sert à rendre compte des différentes catégories de scientifiques, managers et décideurs qui se trouvent engagés dans la production d'un certain type de connaissances, dans le but de mener un certain type de politique environnementale. Le concept de *communauté* élargit le premier, en l'ancrant sur la manière dont ces groupes de savants engagés se positionnent par rapport au futur. Tout en reprenant ces concepts, nous les adoptons en y apportant un certain nombre de changements, au double sens de modification et d'ajout.

De la géographie quantitative et de l'épidémiologie computationnelle

La première des deux spécialités qui font l'objet de notre enquête, à savoir la géographie quantitative, apparaît dans les années 1960 à l'initiative de quelques chercheurs anglo-saxons et français. Elle s'inspire de la physique et vise à fournir un accompagnement à la décision de manière locale et occasionnelle. De l'autre côté, l'épidémiologie computationnelle apparaît dans les années 2000, s'inspire de la météorologie et ambitionne à constituer une infrastructure nationale et internationale pour la prédiction des pics épidémiques. Si d'une part les épidémiologistes sont très présents dans les conférences sur les réseaux complexes et l'ont été dans celles sur les SSC pour lancer le domaine en Europe, les géographes d'autre part sont plus enclins à citer les SSC de manière fréquente et explicite, comme à en revendiquer un usage systématique pour un renouvellement de leur discipline en général. Autrement dit, l'épidémiologie computationnelle naît sur la base des SSC, tandis que la géographie quantitative s'enrichit et se renouvelle grâce aux SSC.

L'un des objectifs de ce chapitre est de combler le manque de la littérature historique et philosophique sur ces deux spécialités en matière de vision sociétale : si des textes existent qui retracent leurs histoires ou qui réfléchissent aux conditions de validité de la connaissance qu'elles produisent, la question axiologique, voire idéologique, relative à ces deux domaines, est peu abordée[2435]. Nous allons le faire en utilisant le

[2433] Haas, P., « Do regimes matter ? Epistemic communities and Mediterranean pollution control », *International Organization*, vol. 43, n. 3, pp. 377-403.

[2434] Granjou, C. & Arpin, I., « Epistemic Commitments : Making Relevant Science in Biodiversity Studies », *Science, Technology, & Human Values*, 2015, vol. 40, n. 6, p. 1025.

[2435] Pour la géographie quantitative, il existe des *histoires indigènes* : Berry, B.J.L. & Pred, A. (ed.), *Central Place Studies : A Bibliography of Theory and Applications*, Philadelphia, Regional Science Research Institute, 1965 ; Robson, B.T., *Urban growth : an approach*, Londres, Metheun & Co. Ltd, 1973 ; Pumain, D., *La dynamique des villes*, Paris, Economica, 1982 ; Cuyala, S., *Analyse spatio-temporelle d'un mouvement scientifique*, *op. cit.* Le texte dédié à cette spécialité le plus récent et le plus exhaustif est un ouvrage en langue française, de nature épistémologique et historique : Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.* Le philosophe propose un certain nombre de concepts analytiques pour appréhender les « théories », les « lois », les « modèles » et les « simulations » proposées en SHS, à partir de la géographie quantitative qui est prise comme terrain pour mettre à l'épreuve ses concepts analytiques. Il retrace ainsi l'histoire de cette spécialité dans le déploiement à la fois chronologique et conceptuel des théories, des lois, des modèles et des simulations

prisme des futurs – lieu privilégié pour observer l'articulation entre connaissances et visions du monde. La première section du chapitre présente un outillage conceptuel destiné à mieux cerner la notion de *communauté d'anticipation*. Les autres sections présentent trois formes de *communautés d'anticipation*, deux concernant les géographes et une les épidémiologistes.

Nous avons consacré l'Annexe II à la présentation des deux spécialités, sur la base de différentes sources bibliographiques primaires et secondaires, des profils prosopographiques de nos interviewés, des théories et des modèles principaux qu'ils ont produits, ainsi que de leur vision de leur spécialité. La caractéristique la plus importante d'un point de vue sociologique qu'il faudra retenir à l'esprit pour la suite concerne l'arène principale vers laquelle les deux spécialités en question se tournent lorsqu'elles sont en quête de légitimité[2436]. La géographie quantitative investit principalement l'arène scientifique, tandis que l'épidémiologie computationnelle, qui est une discipline de terrain, investit surtout l'arène politique.

Quant à la prosopographie des interviewés, ici on dira seulement que les profils dominants parmi les épidémiologistes computationnels sont ceux des physiciens, des mathématiciens, des statisticiens et des informaticiens, tandis que parmi les géographes quantitativistes il y a des géographes, des physiciens et des informaticiens de formation.

Outillage conceptuel

Quant aux concepts, une première considération porte sur le fait qu'il existe une pluralité de termes – anticipation, prédiction, *forecasting*… – qui, selon les contextes, parfois coïncident mais veulent dire des choses différentes ou qui parfois divergent

produits par les géographes quantitativistes pris en examen. Quant à l'épidémiologie, la biochimiste et historienne des sciences américaine Nancy Krieger s'est proposée d'en faire une présentation historique et théorique : Krieger, N., *Epidemiology and the People's Health. Theory and Context*, Oxford, Oxford University Press, 2011, p. VII. La chercheuse ne mentionne pas les nouvelles méthodes computationnelles et digitales qui ont pourtant percolé quelques années avant la publication de son livre. Celui-ci est paru en 2011, mais les premières apparitions scientifiques importantes de l'épidémiologie computationnelle ont lieu dans la deuxième moitié des années 2000 : ce qui est très rapproché de la finalisation du travail de Krieger, qui n'a peut-être pas eu le temps de les inclure dans son récit et dans sa réflexion. En revanche, il existe des philosophes qui ont écrit à propos de cette spécialité. Till Grüne-Yanoff passe en revue cinq MBA de simulation d'épidémies pour illustrer le problème à caractère épistémologique qui, selon lui, définit ce type de modélisations par ordinateur, à savoir la sous-détermination des modèles par les observations : Grüne-Yanoff, T., « Agent-Based Models as Policy Decision Tools : The Case of Smallpox Vaccination », *Simulation & Gaming*, 2011, vol. 42, n. 2, pp. 225-242. Ce philosophe suggère d'utiliser, notamment dans le cas de l'application de ces outils dans le domaine de la décision publique, des approches théoriques plutôt que des intuitions inscrites dans des simulations numériques. Le sociologue Sven Opitz, quant à lui, met les lunettes de Niklas Luhmann pour analyser la manière dont les modèles de l'épidémiologie computationnelle produisent une vision globalisée et interconnectée de la planète pour permettre une intervention politique sur celle-ci : Opitz, S., « Simulating the world », *op. cit.*

[2436] Plusieurs définitions de légitimité existent en circulation. On peut citer par exemple celle que Luc Boltanski et Laurent Thévenot proposent dans *De la justification*, où la légitimité est définie comme un processus qui aboutit à un compromis entre principes auxquels les individus peuvent faire appel pour justifier leurs actions : Boltanski, L. & Thévenot, L., *De la justification. Les économies de la grandeur*, Paris, Gallimard, 1991.

tout en voulant dire la même chose. On apportera quelques éclaircissements sur ces termes par la suite. En deuxième lieu, ce n'est pas dans la littérature sur les promesses et les attentes sociotechniques que nous nous sommes tourné pour construire notre outillage théorique[2437]. En outre, si le concept de *culture épistémique* inclut le volet normatif des communautés scientifiques, Karin Knorr-Cetina n'aborde pas de manière approfondie, dans ses textes, l'aspect de l'idéologie ou de l'axiologie des scientifiques. L'aspect moral et politique représente, cependant, un élément important des *cultures épistémiques*, comme l'a montré Christophe Bonneuil dans son étude sur le positionnement politique d'un certain nombre de chercheurs et de chercheuses par rapport à la problématique des OGM en France[2438]. Cette articulation entre le volet épistémique et le volet normatif est mieux prise en compte par le concept de *régime d'anticipation*.

Avec ce terme, Céline Granjou entend développer et dépasser, en l'incluant, la formule d'*engagement épistémique*, qui mettait l'accent (dans une logique anti-mertonienne) sur le fait que les scientifiques, les experts et les manageurs étudiés n'agissent pas au nom d'une idéologie prédisposant leurs comportements, mais sur la base du fait qu'ils développent leurs engagements et leurs visions du monde *dans le contexte* de leurs pratiques scientifiques et transépistémiques. Dans le *régime d'anticipation* le rapport que les individus ont au futur est, selon Granjou, révélateur de leur *engagement épistémique*. La prosopographie intellectuelle et institutionnelle des individus étudiés, le type de savoirs et techniques mobilisés, le type de discours normatifs et d'actions de recherche ou extra-académiques qui sont menées, représentent tous des éléments utiles à caractériser l'éventail des profils différents en présence dans une communauté donnée. Dans son livre sur les futurs environnementaux, Granjou définit le concept de *régime d'anticipation* en fonction de son terrain spécifique, constitué par les spécialistes de la biodiversité :

> « A regime of anticipation is defined as a group of researchers, experts and managers sharing a specific scenario and representation of the future of biodiversity, to a certain kind of project of understanding the evolution of biodiversity (disciplinary approaches and research methods judged as relevant and important with regard to the scenarios), to a certain model of science/politics interface. Communities of anticipation thus also share a certain politics of anticipation (i.e. a prescriptive view of the kind of environmental governance that we need to implement). Communities of anticipation therefore not only share a vision of the future of biodiversity and a prescriptive ideology, but also a kind of

[2437] Par exemple, Brown, N. & Michael, M., « A Sociology of Expectations : Retrospecting Prospects and Prospecting Retrospects », *Technology Analysis & Strategic Management*, 2003, n. 15, pp. 3-18 ; Van Lente, H., *Promising Technology. The Dynamics of Expectations in Technological Developments*, Thèse doctorale, Université de Twente, 1993.

[2438] Bonneuil, C., « Cultures épistémiques et engagement public des chercheurs dans la controverse OGM », *op. cit.*

practical investment into a project of knowledge and governance to face the future with »[2439].

Les éléments que Granjou a pris en considération pour caractériser ces quatre régimes sont les suivants :

- Le *type de scénarios produits* : p.e. celui d'une érosion de la biodiversité, celui d'une perte de services écosystémiques ou bien celui d'un sauvetage des écosystèmes par le biais de l'innovation de l'ingénierie écologique ;
- Les *approches disciplinaires et technologiques mobilisées* par les individus : p.e. la biologie évolutive, l'écologie évolutive ou la microbiologie ;
- Les *activités de conseil et de collaboration* qu'ils engagent : p.e. l'évaluation d'impact écologique, la coproduction de mesures de gestion des ressources ou la collaboration avec des partenaires privés ou publics pour mener des actions concrètes ;
- Le *type de politique d'anticipation* qu'ils soutiennent : p.e. la vulgarisation scientifique, la cogestion des ressources avec plusieurs « parties prenantes » ou le développement de techniques d'ingénierie écologique.

Le terme de régime est très répandu dans les sciences sociales pour désigner des phénomènes très différents. On l'utilisera dans la suite pour nommer des concepts qui structurent celui de Granjou. Ainsi, pour éviter une confusion entre les niveaux, on préfère la notion de *communautés d'anticipation*, que la sociologue emploie elle-même comme synonyme de régime. Cela dit, on propose un certain nombre de modifications et ajouts à la liste de quatre éléments que Granjou a repérés pour donner corps à un régime, en partie pour adapter le concept au terrain des SSC et en partie pour contribuer à l'enrichir et à l'affiner :

1) Si on garde l'élément des *disciplines et techniques mobilisées*, en fonction de notre terrain nous supprimons la voix des *scénarios produits*. Car si les scientifiques, les experts et les managers de la biodiversité étudiés par Granjou se caractérisent par leur soutien vis-à-vis d'un scénario particulier concernant le futur des écosystèmes, nos interviewés ne portent pas *un* seul scénario du futur. En outre, tandis que les épidémiologistes computationnels travaillent souvent avec plusieurs scénarios, les géographes quantitativistes n'en produisent pas si souvent et, quand ils le font, c'est dans une logique totalement différente de celle de leurs collègues en santé publique. On aura l'occasion d'y revenir.

2) Ensuite, on remplace la voix des *activités de conseil et de collaboration* avec le terme de Knorr-Cetina, plus compact et précis, d'*activités (ou travail) transépistémiques*. De portée plus générale, ce concept met l'accent sur le fait que les chercheurs et les chercheuses sortent du laboratoire pour interagir avec des figures professionnelles autres que scientifiques, et cela pour des raisons bureaucratiques, de

[2439] Granjou, C., *Environmental Changes. The Futures of Nature*, Oxford, Elsevier, 2016, p. 106.

financement, de légitimité ou d'engagement sociopolitique. Il s'agit de voir quelle est leur conception de l'expertise, à savoir du rapport entre science et société : la science est-elle neutre, pour eux, ou peut-elle, doit-elle être engagée ? Quel est le rôle du scientifique face aux pouvoirs publics, aux ONG ou aux entreprises ? Est-ce que l'engagement est l'apanage des scientifiques et des experts, ou est-il ouvert à la contribution de la part d'autres groupes sociaux ? Et les choix d'ordre épistémique et axiologique s'opèrent à quel moment et comment ?

3) Quatrièmement, nous proposons de remplacer le *type de politique d'anticipation* par le concept plus riche et complexe d'*imaginaire sociotechnique*, proposé par Sheila Jasanoff, qui le définit ainsi :

> « we redefine sociotechnical imaginaries in this book as collectively held, institutionally stabilized, and publicly performed visions of desirable futures, animated by shared understandings of forms of social life and social order attainable through, and supportive of, advances in science and technology »[2440].

Avec ce concept, Jasanoff vise à saisir dans un tout cohérent la matérialité technoscientifique, le sens (*meaning*), les valeurs morales et les visions de l'ordre politique qu'un ensemble d'individus, tous rôles confondus, articulent et propagent à travers des groupes organisés, comme les entreprises, les mouvements sociaux, les gouvernements ou les associations professionnelles. L'aspect moral et politique qui le compose fait du terme d'*imaginaires sociotechniques* un synonyme partiel d'idéologie[2441] : « Imaginaries, moreover, encode not only visions of what is attainable through science and technology but also of how life ought, or ought not, to be lived ; in this respect they express a society's shared understandings of good and evil »[2442]. Le terme est cependant multidimensionnel. Jasanoff propose, pour l'examiner, de regarder sur plusieurs sites : notamment, les discours, les pratiques, les lois et les textes politiques. Nous disposons d'un matériau composé surtout d'entretiens avec des scientifiques et quelques figures extra-académiques, aussi bien que d'articles de recherche et de littérature grise à caractère politique. Ce chapitre, en outre, ne se base

[2440] Jasanoff, S., « Future Imperfect : Science, Technology, and the Imaginations of Modernity », dans Jasanoff, S. & Kim, S.-H. (ed.), *Dreamscapes of Modernity. Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*, Chicago & London, The University of Chicago Press, 2015, p. 4.

[2441] Jasanoff, dans le chapitre cité, énumère les possibles synonymes précédents au concept qu'elle propose, en en montrant les différences et les limites explicatives par rapport à ce que recouvre l'*imaginaire sociotechnique*. L'idéologie est parmi ces termes proches mais rejetés par la sociologue, en raison du fait que les constructions idéologiques sont généralement vue comme encadrées et immuables. Et ce n'est pas forcément le cas pour nous. Les autres termes considérés et rejetés par Jasanoff sont *master narrative* et *discours* : pour les raisons de la récusation, nous renvoyons au chapitre. Quoi qu'il en soit, on se réserve le droit d'utiliser des termes plus classiques lorsqu'on s'adressera à des aspects plus spécifiques : axiologie (valeurs éthiques et esthétiques), idéologie (valeurs, métaphysique et surtout vision de l'ordre social), cosmologie (vision de la nature). Parfois – et cela dépendra du contexte – ces mêmes termes seront utilisés comme synecdoques d'*imaginaire sociotechnique* : une partie pour le tout.

[2442] Jasanoff, S., « Future Imperfect », *op. cit.*, p. 4.

pas sur une ethnographie fine de l'interface entre scientifiques et représentants d'autres domaines du public et du privé, bien que nous ayons mené des entretiens avec certains entrepreneurs, certains représentants du monde des *think tank* et quelques fonctionnaires des instituts de santé publique nationaux. Par contre, par rapport à Jasanoff et à Granjou, nous nous proposons de prendre en compte comme objet d'étude aussi les modèles, point qui mérite une discussion à part.

D'une part, les scientifiques débattent quant au nombre de paramètres à prendre en considération pour confectionner leurs modèles, afin de les valider ou de les falsifier, d'autre part les philosophes des sciences se concentrent sur des aspects éminemment épistémiques – par exemple Till Grüne-Yanoff met en doute le pouvoir explicatif des simulations MBA[2443], alors que, pour sa part, Corinna Elsenbroich le défend[2444]. Relativement rares sont les travaux, écrits par des modélisateurs ou par des philosophes, qui portent sur le problème de la normativité inscrite dans des modèles soi-disant neutres. Ces communautés épistémiques ne semblent pas se poser très souvent la question de Langdon Winner : *Do artifacts have politics*[2445] ? Toutefois, les sciences sociales, notamment dans le cadre des STS, ont plusieurs fois interrogé la prétendue neutralité des modèles, en montrant que ceux-ci ne sont jamais proposés ou utilisés dans le vide, qu'ils ne sont jamais neutres. Un modèle est toujours accompagné par une charge métaphysique et idéologique. Les visions du monde des scientifiques se retrouvent donc inscrites dans les équations mathématiques et dans les lignes de code qu'ils produisent, ainsi que dans les interprétations qu'ils en donnent. Les anthropologues des savoirs ont par exemple montré comment les cultures influencent la pensée scientifique. Pour citer un classique, Emily Martin a illustré la manière dont les stéréotypes culturels de mâle et de femelle ont influencé la manière dont les manuels d'anatomie ou les articles de vulgarisation illustrent la fécondation humaine, en décrivant le sperme comme le prince charmant actif et courageux et l'ovule comme la belle au bois dormant passive et impuissante[2446]. Stefan Helmreich, de son côté, a montré que la vision, que les informaticiens et les entreprises du numérique ont des virus computationnels, puise dans le langage de l'immunologie, de celui de la lutte entre les nations, ou bien de celui du capitalisme adaptatif[2447]. D'autres exemples existent[2448], mais on citera un dernier travail, dont nous nous inspirons.

[2443] Grüne-Yanoff, T., « Agent-Based Models as Policy Decision Tools », *op. cit.*

[2444] Elsenbroich, C., « Explanation in Agent-Based Modelling », *op. cit.*

[2445] Winner, L., « Do artifacts have politics ? », *op. cit.*

[2446] Martin, E., « The Egg and the Sperm : How Science Has Constructed a Romance Based on Stereotypical Male-Female Roles », *Signs*, 1991, vol. 16, n. 3, pp. 485-501.

[2447] Helmreich, S., « Flexible Infections : Computer Viruses, Human Bodies, Nation-States, Evolutionary Capitalism », *Science, Technology & Human Values*, 2000, vol. 25, n. 4, pp. 472-491.

[2448] Par exemple, Nading, A.M., « The lively ethics of global health GMOs : The case of the Oxitec mosquito », *BioSocieties*, 2015, vol. 10, n. 1, pp. 24-47 ; Taylor, P.J. & Buttel, F.H., « How do we Know we have Global Environmental Problems ? Science and the Globalization of Environmental Discourse », *Geoforum*, 1992, vol. 23, n. 3, pp. 405-416.

La sociologue Élodie Vieille Blanchard a enquêté sur le modèle World produit par une équipe du MIT et publié dans le rapport du Club de Rome intitulé *Limits to Growth*[2449] et sur les modèles alternatifs qui ont été ensuite développés pour montrer les zones d'ombre du modèle World. Elle a notamment montré que les différentes équipes modélisatrices, en fonction de leurs *priorités* et de leurs *solutions préconisées*, ont mis en lumière certains aspects plutôt que d'autres (l'innovation technologique plus que la finitude des ressources, par exemple), en produisant des invisibilisations. Pour cette raison, Vieille Blanchard propose d'étudier les modèles afin « de comprendre de quelle manière ils parviennent à intégrer certaines préoccupations et certains choix de société dans une forme prétendument objective et rationnelle »[2450]. Pour ce faire, elle a employé le concept de « cosmologie »[2451] tel que proposé par le sociologue des sciences britannique Brian Bloomfield[2452], concept qui essaie de « saisir comment des croyances partagées par des groupes peuvent se trouver intégrées dans des équations mathématiques »[2453]. Vieille Blanchard propose, par conséquent, de « saisir la spécificité de l'objet 'modèle' comme instrument d'investigation, d'argumentation et de communication », afin de montrer comment dans chaque modèle « s'articulent une méthodologie et un système de valeurs bien particuliers »[2454]. Prendre en compte les modèles dans ce qu'ils ont de révélateur pour caractériser l'*imaginaire sociotechnique* permet de rajouter une épaisseur ultérieure tant au concept de Jasanoff qu'à celui de Granjou.

4) Pour retourner à la liste des éléments à prendre en compte pour décrire une *communauté d'anticipation*, apportons quelques ajouts. En premier lieu notre concept d'*onto-épistémologie*, défini dans le chapitre 13. Ce concept permet de voir qu'à une posture sur les conditions de validité des connaissances, et sur la manière d'utiliser ces dernières, correspond une vision métaphysique de la nature et des humains qui les justifie. On verra qu'il y a un lien étroit entre l'idéaltype auquel appartiennent nos interviewés et leur *engagement épistémique*. Sans présupposer une cohérence de nature logico-normative interne à chaque idéaltype, on relève en revanche que certaines positions sur le savoir s'accordent le plus souvent avec certaines positions sur l'être et sur le politique.

5) La caractérisation de la position onto-épistémologique des interviewés a des implications directes sur la voix suivante, celle de la *performativité de la simulation* : ou plutôt, la performativité que les scientifiques attribuent à leurs simulations dans les différents contextes scientifiques et transépistémiques où ils agissent. Si on part du

[2449] Meadows, D.H. et al., *The Limits to Growth*, *op. cit.*

[2450] Vieille-Blanchard, E., « Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles », dans Dahan Dalmedico, A. (ed.), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007, p. 34.

[2451] Plus ou moins équivalent à celui d'idéologie ou du plus complexe *imaginaire sociotechnique*.

[2452] Bloomfield, B.P., *Modelling the World. The Social Constructions of System Scientists*, Oxford, Blackwell, 1986.

[2453] Vieille-Blanchard, E., « Croissance ou stabilité ? », *op. cit.*, p. 34.

[2454] *Ibid.*, p. 22.

présupposé que prédire/anticiper ce qui arrivera demain sert à légitimer ce que l'on va faire aujourd'hui[2455], il paraît évident que, pour pouvoir faire des affirmations ou poursuivre des actions par rapport au futur, il faut se donner des *prises* sur celui-ci[2456]. À titre d'exemple, la conception du libre arbitre nous semble un indicateur onto-épistémologique important de la prise que certains individus de notre corpus se donnent sur le futur : si le libre arbitre existe et qu'il est, d'après eux, plus ou moins le « moteur de l'histoire », alors prévoir devient difficile, voire impossible ; si d'autre part le libre arbitre n'est qu'une illusion et que les comportements humains sont en fait réguliers, le futur devient plus facilement prédictible.

6) Le concept de *régime d'énonciation des futurs* introduit par Francis Chateauraynaud nous paraît également utile pour caractériser un des aspects des *communautés d'anticipation*. Quatre éléments les caractérisent : une modalisation du temps, une logique d'action, un prototype et la forme que peut prendre la critique envers chacun des régimes définis par le sociologue[2457]. Bien que Chateauraynaud ne considère pas la liste qu'il examine comme close ni comme faite de compartiments étanches, les régimes qu'il identifie sont en nombre de sept : urgence, attente, anticipation, prévision, prospective, promesse et prophétie[2458]. La troisième, la quatrième et la cinquième sont celles qui nous intéressent ici. Dans le cas de l'anticipation, la modalisation du temps est celle d'un « temps accéléré » ; la logique d'action implique une « [a]ction sur le processus en cours » en se basant sur des précédents afin d'agir en amont ; deux prototypes sont, à titre d'exemple, l'alerte climatique ou la gestion des pandémies ; tandis que les critiques dont ce régime peut faire l'objet s'en prennent au manque de vigilance ou alors à une surinterprétation des signaux faibles. Dans le cas de la prévision, la modalisation du temps est celle d'un « temps calculé et linéarisé » ; la logique d'action implique un « espace de calcul » et la mise en place d'une « planification » ; deux prototypes sont, à titre d'exemple, le vieillissement ou la fin du pétrole ; tandis que les critiques dont ce régime peut faire l'objet s'en prennent à l'imprévisibilité de ce qu'on prétend pouvoir prédire ou à une « projection naïve du passé ». Dans le cas de la prospective, la modalisation du temps est celle d'un « temps non-linéaire, ouvert sur une pluralité de temporalités » ; la logique d'action implique une « [s]cénarisation des futurs », une « ouverture aux possibles » ; deux prototypes sont, à titre d'exemple, les scénarios énergétiques ou les innovations technologiques ; tandis que les critiques dont ce régime peut faire l'objet s'en prennent à la

[2455] « Les scénarios n'entendent pas produire directement des effets de cadrage […] sur les politiques publiques. Leur rôle se situe davantage au niveau de la légitimation symbolique de certaines visions d'avenir et de la production d'images du changement qui sont conçues comme capables d'agir sur les images détenues par les acteurs sociaux » : Andersson, J. & Prat, P., « Gouverner le 'long terme'. La prospective et la production bureaucratique des futurs en France », *Gouvernement et action publique*, 2015, vol. 3, n. 3, p. 17.

[2456] Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces*, *op. cit.*

[2457] Chateauraynaud, F., « Regard analytique sur l'activité visionnaire », dans Bourg, D., Kauffman, A. & Joly, P.-B. (ed.), *Du risque à la menace*, PUF, 2013, pp. 300-301.

[2458] Dans son dernier travail avec Josquin Debaz, la liste s'enrichit d'une huitième voix, celle de science-fiction : Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible*, *op. cit.*

« [p]rolifération de scénarios indécidables » et au « [r]isque de relativisme ». On verra que les trois *communautés d'anticipation* que nous avons identifiées mixent et articulent ces trois *régimes du futur* dans de manières originales.
7) Une septième voix est celle du *rapport au futur*, qui se réfère à la manière dont les groupes en question perçoivent et manient l'avenir, ou se comportent en fonction de ce dernier. Est-ce qu'ils se proposent de construire un monde plus désirable ou bien se concentrent-ils sur le fait de déjouer un avenir indésirable ? Est-ce qu'ils planifient ou se préparent ? De manière métaphorique, on se demandera quelle est la vision que les représentants des différents régimes ont de la flèche du temps. Elle va du présent (ou du passé) vers le futur ou du futur vers le présent ?
8) Enfin, pour notre terrain spécifique, nous ajoutons la voix : *visions des systèmes complexes*. C'est là que se condense la réponse à notre problématique de départ. À chacune des trois *communautés d'anticipation* correspond une vision différente des systèmes complexes. Si l'une d'entre elles s'approche en effet de la vision plate, auto-organisée et compétitive des systèmes socio-techno-écologiques, les deux autres s'en distinguent sur plusieurs points, l'une étant non-plate et ancrée sur l'importance des *hubs* dans un réseau, tel l'État ou ses manifestations concrètes, et l'autre assumant une posture anti-compétitive qui vise à donner aux éléments individuels d'un système complexe la prise nécessaire pour réaliser des changements macroscopiques au niveau de l'ensemble homme-nature dont ils font partie.
Pour résumer en conclusion, de la liste quadripartite de Granjou, on garde le deuxième élément (disciplines et techniques mobilisées), on supprime le premier (le type de scénario produit), on renomme le troisième (activités de conseil) et le quatrième (politique d'anticipation), tandis qu'on rajoute quatre nouvelles catégories. Notre liste est donc la suivante :
Disciplines et techniques mobilisées
Activités transépistémiques
Imaginaire sociotechnique
Onto-épistémologie
Performativité de la simulation
Régime d'énonciation des futurs
Rapport au futur
Visions des systèmes complexes.

Les trois communautés d'anticipation

Avant d'examiner les spécificités des trois *communautés d'anticipation* repérées à partir du terrain des SSC, on dira un mot sur les caractéristiques que la géographie quantitative et l'épidémiologie computationnelle partagent. En premier lieu, elles ont en commun le fait d'avoir une place relativement marginale au sein du champ

disciplinaire plus vaste qui leur est propre. Deuxièmement, elles partagent ce que Chateauraynaud appelle les *régimes d'énonciation* : si aucune des deux spécialités n'est sur le registre de la promesse ou de la prophétie, les deux en revanche partagent le même régime énonciatif de l'anticipation : « l'anticipation est un régime qui permet de dépasser les deux autres [urgence et attente], d'assurer des prises en amont, d'être prêt, de disposer de repères et d'outils permettant de faire face et, ce faisant, de favoriser avec plus d'assurance le futur désiré tout en éloignant celui que l'on redoute le plus »[2459]. En outre, dans le cadre de la *matrice des futurs* mise au point toujours par le même sociologue, nos deux spécialités viennent un peu bouleverser le panorama, parce qu'elles se retrouvent toutes les deux à cheval entre la deuxième et la troisième catégorie. Elles s'occupent, en effet, à la fois du moyen et du long terme, elles font à la fois de la programmation et de la scénarisation, toutes les deux relèvent du cadre du « Pas encore là mais en préparation » et, enfin, toutes les deux sont à cheval entre une logique d'action de la détermination du futur et une logique de possibilisation.
Les points en commun s'arrêtent toutefois ici, car non seulement l'épidémiologie computationnelle relève d'une *communauté d'anticipation* différente de la géographie quantitative, mais en plus celle-ci est divisée en deux communautés différentes. En ayant choisi les noms sur la base de leur *imaginaire sociotechnique*, voici donc la communauté de l'*innovation libérale*, celle de la *coconstruction autogestionnaire* et celle de la *prémédiation centralisée*.

Communauté de l'innovation libérale

Il s'agit de la communauté qui présente le plus de variations en interne. On y trouve Denise Pumain et ses collaborateurs et doctorants, les deux ex-physiciens du SFI West et Bettencourt, ainsi que l'anglais Michael Batty. Les variations observées à l'intérieur de ce groupe social ne justifient pas pour autant des distinctions ultérieures, puisqu'il s'agit de nuances à l'intérieur d'un même espace de variations.

Disciplines et techniques mobilisées

Varenne distingue la géographie « idiotypique » de la géographie « nomothétique ». La première, plutôt narrative voire littéraire, « est celle qui commande à la géographie de se focaliser sur les aspects singuliers […] [l]a région [devenant] alors le lieu privilégié »[2460]. Celle nomothétique cherche, comme le dit son nom grec, « des lois géographiques transcendant les particularismes régionaux »[2461]. Si on avait donné plus de poids à l'aspect des savoirs produits, la *communauté de l'innovation libérale* aurait pu s'appeler *communauté physicalo-nomothétique* en raison des disciplines et techniques mobilisées. Les représentants de cette communauté sont, en effet, soit des ex-physiciens qui se proposent de faire une physique de la ville avec les outils qu'ils

[2459] Chateauraynaud, F., « Regard analytique sur l'activité visionnaire », *op. cit.*, p. 303.
[2460] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.*, p. 29.
[2461] *Ibid.*, p. 30.

ont appris à manier dans leur carrière précédente, soit des géographes à fort penchant quantitativiste qui visent à faire de la géographie une science à l'aune de la physique, discipline d'où, par ailleurs, ils ou elles puisent pour mettre au point leurs méthodes numériques. Par exemple, West et Bettencourt appliquent les lois de puissance aux bases de données des villes du monde. Comme le montre la fig. 21, ces lois de puissances montrent que les phénomènes sociaux (positifs et négatifs qu'ils soient) augmentent au même rythme en fonction de l'augmentation démographique. Ainsi, le PIB, les salaires, les brevets croissent tout aussi que le nombre des crimes. Et c'est cette régularité qui leur fait considérer les villes comme des phénomènes prédictibles.

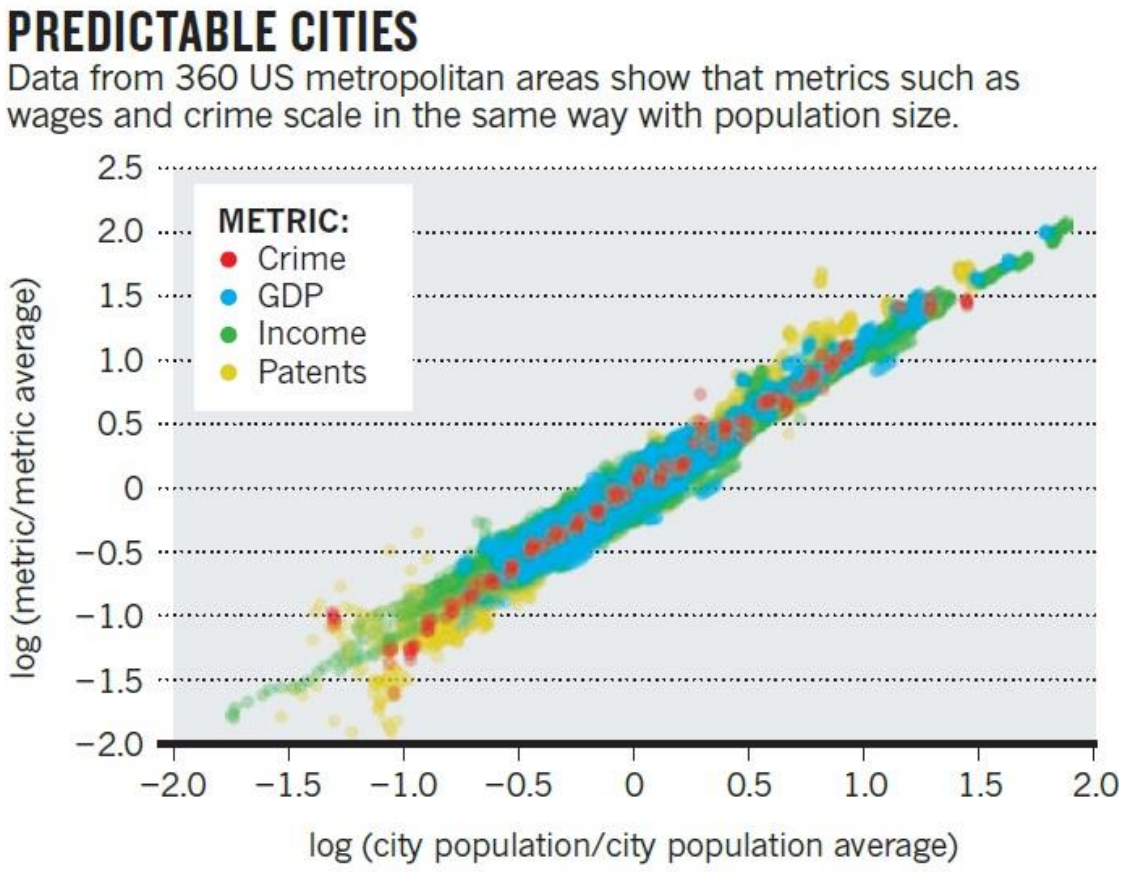


Figure 21. Loi de puissance appliquée à une base de données de 360 villes américaines. Graphe tiré de Bettencourt, L. & West, G., « A unified theory of urban living », Nature, 2010, vol. 467, p. 913

Pumain et ses collègues inscrivent ces lois de puissance dans des MBA, qui intègrent également des lois « gravitaires » ou des fonctions décrivant les échanges de marchandise, population et innovations entre les villes, échanges interprétés sous la forme de « flux ». Batty, quant à lui, aborde la ville par le biais de la géométrie des fractales, par les automates cellulaires ou par les réseaux de la physique statistique.

Les membres de cette communauté exercent du conseil occasionnel, de la collaboration parfois informelle, ou alors de l'accompagnement à la décision, plus rarement de l'aide à la décision. Les nuances qui différencient ces termes sont importantes pour nos interviewés. Quand ils font du conseil occasionnel, c'est parce qu'il s'agit d'un financement de la part d'une ONG ou d'une entreprise autour d'un projet précis et à terme, avec des finalités « applicatives » explicites (c'est le cas de Bettencourt et West ou des informaticiens de l'ISC-PIF). Quand il s'agit d'une collaboration informelle, il n'y a pas de cadre officiel ni de financement : il s'agit plutôt d'un troc, dans lequel l'entité publique ou privée fournit des bases de données aux scientifiques qui, en retour, leur donnent leurs modèles ou partagent avec elles de manière prioritaire les résultats issus de ces derniers (c'est le cas de Bettencourt et West). On parle d'accompagnement à la décision quand les autres « parties prenantes » peuvent avoir accès à au moins une partie des phases de construction du modèle et/ou quand elles peuvent l'utiliser en autonomie (c'est le cas de Banos et de certains doctorants de Pumain). C'est enfin de l'aide à la décision quand le géographe quantitativiste fournit des outils « scientifiques » aux pouvoirs publics ou autres pour la prise de la décision (c'est le cas de Batty). En général, ces chercheurs et chercheuses pensent en général la science comme un savoir neutre, à même de pouvoir faire de la politique de par son objectivité et performance. La science ou les scientifiques ne sont jamais vus comme des remplaçants de la classe politique, toutefois la vision de la *communauté de l'innovation libérale* est qualifiable de technocratique, car selon ses membres la science doit informer les décideurs, les ONG ou les entreprises de « ce qui est », pour que ces derniers puissent atteindre leurs buts.

Bettencourt se propose, par exemple, de fournir aux décideurs non pas la décision, mais la connaissance sur laquelle la décision doit reposer : « You wouldn't build a rocket that would go against the laws of physics, but people often think of social and urban solutions that would go against what we know about the laws of society and the laws of economics »[2462]. Pour lui, la science se distingue bien de la décision et le scientifique peut se permettre d'avoir un engagement politique en tant que citoyen, mais non pas en tant que scientifique :

> « Science is not policy, science sets parameters. […] So there are limits to what you can say from the perspective under which you're an expert and then we all can be armchair politicians and bring our personal preferences to the table and become a citizen but that's a different position. We should all do that as citizens but that's a different thing »[2463].

[2462] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.
[2463] *Ibid.*

Science et politique sont pour lui séparées et le travail du scientifique n'est pas celui de dire ce qui doit être, mais ce qui est :

> « first thing, science is not policy in the following sense just like science is not engineering. Science is supposed to tell me how things work whereas policy is – or engineering even – is about making a specific thing that does something specific in a given context. So the example I always like to take […] is going to the moon. You could not go to the moon without understanding the laws of motion and the laws of gravity. […] but once you start building a rocket what materials you use, what budget you have, where you do it, who does it, that's policy right ? »[2464].

Lors de son *travail transépistémique*, Bettencourt dit vouloir d'abord comprendre quels problèmes ses interlocuteurs visent à résoudre et de quels savoirs ils ont besoin. Que cela concerne la criminalité ou l'efficience des infrastructures, pour ce géographe quantitativiste nombre de problèmes socio-économiques relatifs aux villes surgissent à cause du manque de théories correctes à leur égard. Souvent, argumente-t-il, cela est dû à la conviction répandue selon laquelle la connaissance pratique que chacun peut avoir du fonctionnement des villes est suffisante pour les gérer, alors que le physicien souligne la nécessité, de son point de vue, d'étudier les phénomènes à partir d'un niveau plus fondamental. Sa perspective, informée par les SSC, le porte à voir la relation entre les différents cycles composants une ville comme interconnectés dans des rapports imbriqués et réciproques, où les causalités ne sont jamais linéaires et unidirectionnelles, mais entremêlées et co-évolutives. Dans ce cadre, ce qu'un décideur politique informé par quelqu'un comme Bettencourt peut faire, c'est essayer de diriger les flux ou les causalités, mais non pas les détruire ou en créer des nouveaux : « what you do with policy is to drive these loops in the right direction […] You cannot break those rules or build them anew but you can drive them in the right or wrong direction »[2465]. Pour ce chercheur, le métier du décideur politique est comme celui d'un surfeur : « it's like catching a wave, the wave is already there but you can go faster if you know how to catch it. If you are against it it's not going to work »[2466].
Avec quel genre d'organismes Bettencourt discute et collabore ? « I talk to a lot of people »[2467]. Pour rendre compte de l'hétérogénéité de ces relations, on citera quelques exemples. Le physicien et géographe a participé à la rédaction d'un rapport pour la Maison Blanche, le « Report on Technology and the Future of Cities », présenté par le Council of Advisors on Science and Technology (ou PCAST) du président Barack

[2464] *Ibid.*
[2465] *Ibid.*
[2466] *Ibid.*
[2467] *Ibid.*

Obama en février 2016[2468]. Sorte de *think tank* composé de scientifiques, de technologues et de décideurs politiques (qui, eux, proposent des solutions concrètes), le PCAST sur les villes a recommandé le Président de développer les « *smart cities* », à travers la modernisation des infrastructures (énergie, eau, transports) et l'usage des technologies informatiques : dans tous les cas, le maître-mot est celui de l'« innovation ». À l'automne 2016, Bettencourt a participé également à la conférence biannuelle des Nations Unies, notamment Habitat III, sur la définition d'une nouvelle feuille de route – the New Urban Agenda – pour le développement des villes dans les vingt prochaines années[2469]. Une collaboration ultérieure de Bettencourt est celle avec l'ONG Slum Dwellers International, qui fédère les citoyens et les citoyennes pauvres des périphéries du monde entier, en particulier du monde postcolonial, pour améliorer les conditions de vie des quartiers défavorisés. Le projet en particulier sur lequel Bettencourt a travaillé s'appelle Open Reblock[2470], dont le but était de construire des routes, des voies d'accès et des services dans les quartiers du Cap et de Mumbai qui en sont dépourvus.
Le physicien-géographe a collaboré également avec la Banque Mondiale et la Corporation Andine de Développement, avec lesquelles il a entamé un processus informel d'échange de matériaux. Les conseils que Bettencourt donne à tous ces organismes ne relèvent pas de simples solutions. Les seules prescriptions du chercheur concernent la collecte de données, car des données d'un certain type peuvent faciliter son travail de modélisation. Celui-ci à son tour peut faciliter la prise de décision qui a des objectifs d'efficacité et de durabilité :

> « You have a conversation about what they are trying to do and it varies. So I'm not going to tell them exactly what to do because that's their problem, but I'm going to tell them what can be done, what data they could collect, how maybe it was done somewhere else, why this is important from a scientific and empirical perspective and that's usually what we do. And people who are in policy are interested because obviously they would like to have better, cheaper solutions. They would like to find ways for their work to be easier and have more permanent effects »[2471].

Le rapport avec les décideurs politiques naît lors de conférences ou par des intermédiaires, et si Bettencourt est si disponible ce n'est pas uniquement, dit-il, pour sa volonté de se rendre utile à des bonnes causes, mais aussi parce qu'il voit ces sujets politiques comme des « expérimentateurs », donc comme le pendant empirique de son

[2468] President's Council of Advisors on Science and Technology, *Report to the President on the Technology and the Future of Cities*, février 2016.
[2469] Site officiel de Habitat III : http://habitat3.org.
[2470] Site officiel d'Open Reblock : http://openreblock.org.
[2471] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.

travail théorique, qui peut être ainsi nourri par des nouvelles données ou confirmé par la mise en place de certaines mesures.
Moins actif que Bettencourt dans les *arènes transépistémiques*, West est toutefois proche du milieu des *smart cities*. Bien que, dans son livre grand-public *Scale*, il juge ce mouvement comme porteur potentiel de promesses trop optimistes et naïves[2472], et bien qu'il pense surtout à l'usage qu'il aimerait faire des données que les dispositifs numériques de tels centres urbains sont capables de produire[2473], le physicien-géographe est en fait souvent invité, depuis quelques années, par les membres de l'administration de la ville de Singapour, *smart city* par excellence. Cela afin de fournir du conseil ou, depuis peu, pour mettre en place des projets en collaboration avec le SFI pour à la fois étudier et planifier le développement urbain de l'agglomérat urbain du sud-est asiatique[2474].
Mutatis mutandis, la philosophie de fond de nos interviewés français – géographes ou informaticiens – ne diffère pas de manière substantielle de celle de leurs collègues du SFI. Mathieu Leclaire, qui avec Romain Reuillon, Guillaume Chérel et Paul Chapron travaille pour une compagnie de conseil infrastructurel aux entreprises, explique que ce qu'il va faire avec ses collègues ce n'est pas de la prédiction, mais de l'aide à la décision : « Prédiction, il est un peu du : 'Je vais te dire comment ça sera dans le futur'. Dans 'aide à la décision', […] ça te donne un peu une idée de ce que ça peut être mais avec quand-même une forme d'incertitude, quoi »[2475]. Chapron nous a fourni un exemple concret de ce type de collaborations :

> « [Les informaticiens de cette entreprise de conseil] proposent des modèles pour, admettons, évaluer le coût pour une entreprise […] de délocaliser leur usine ou d'ouvrir trois succursales à tel endroit de l'Île-de-France ? Cela va faire des déplacements pour des gens qui y travaillent, peut-être des démissions, peut-être des absentéismes, peut-être le besoin d'embaucher d'autres gens […] Ou alors un investisseur urbain type le Grand Paris, qu'est-ce que cela changerait de rajouter une bretelle d'autoroute ici et là, de faire un deuxième pont entre ici et là sur le trafic journalier de Paris ? Combien cela coûterait en énergie de rendre le centre de Paris piéton […] ? »[2476].

Quant à Pumain, la posture du scientifique par rapport à la décision en matière politique ou entrepreneuriale « dépend des circonstances »[2477] :

[2472] West, G., *Scale. The universal laws of life and death in organisms, cities and companies*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2017, p. 270.
[2473] *Ibid.*, p. 294.
[2474] Entretien avec Geoffrey West, 19.07.18.
[2475] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[2476] Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
[2477] Mail de Denise Pumain, 02.07.18.

> « si on a sollicité ou accepté un contrat pour construire un modèle qui doit permettre une application, alors oui on s'engage, on travaille du mieux possible et on le défend ! Quand on est plus libre, l'enjeu est de respecter une meilleure cohérence entre des propositions théoriques et des observations empiriques, en ne négligeant pas trop de points de vue »[2478].

Que cela soit par des articles scientifiques ou par du conseil auprès d'organismes politiques nationaux ou internationaux, l'espoir de la géographe française est de faire rentrer « petit à petit […] des choses dans les méthodes d'observation et de mesure en Europe »[2479]. La condition qu'elle pose pour que cela réussisse est épistémologique, puisqu'elle montre des réserves dans la diffusion de leurs travaux tant que ces derniers n'ont pas encore été soumis à la discussion critique par des pairs : « Les sciences sociales peuvent proposer quelques modèles, mais elles doivent être relativement assurées de la qualité de leur conception avant d'en proposer l'application »[2480]. De manière conséquente, si les méthodes sont jugées encore en phase de test, les rapports avec les pouvoirs publics pour une aide à la décision sont plutôt faibles : « J'hésite cependant à essayer de 'vendre' les modèles que je construis à quiconque, car ce sont plutôt des modèles conceptuels, faits pour interpréter plutôt que pour transformer »[2481]. Pumain pense n'avoir jamais eu « une quelconque influence sur un quelconque processus social réel »[2482]. Elle revendique le choix, avec sa collègue Lena Sanders, de faire de la « science fondamentale » avant de faire de l'« ingénierie »[2483], qui est définie comme « l'application de la science à un problème »[2484]. Elle se souvient tout de même d'une thèse en CIFRE, dont elle a été la directrice, qui proposait un système de modélisation des arrêts de métro de la RATP pour surveiller et réduire les vols sur les quais. La doctorante, d'après Pumain, était mal à l'aise par rapport aux données collectées par la RATP :

> « Le plus intéressant qui l'a mise mal à l'aise dans toute sa thèse c'était de dire, 'Mais vous savez, les données que vous me faites passer ne permettent pas de donner une représentation complètement satisfaisante des faits que vous observez, parce qu'on enregistre le vol au lieu où il est déclaré, et pas au lieu où il s'est produit […]' »[2485].

[2478] *Ibid.*
[2479] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2480] Mail de Denise Pumain, 02.07.18.
[2481] *Ibid.*
[2482] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2483] *Ibid.*
[2484] Mail de Denise Pumain, 02.07.18.
[2485] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.

Finalement les services de la RATP, qui avaient refusé de changer leurs méthodes de collecte des données, ont fini par intégrer le conseil quelques temps plus tard. « Voilà, conclut Pumain, un exemple de feed-back d'un œil scientifique sur la qualité de la donnée »[2486]. De manière secondaire, elle cite aussi la DATAR, la Délégation à l'aménagement du territoire, comme un lieu où les méthodes de la géographie quantitative ont percolé petit à petit depuis quelques années, dans un processus « incrémental »[2487]. Mais la géographe affirme que ces expériences sont moins tangibles par rapport à l'impact que, selon elle, a réussi à avoir Arnaud Banos, qui certes provient du même laboratoire que Pumain et du même milieu francilien des SSC, mais qui a en revanche un background d'étude et un *imaginaire sociotechnique* différents. Pour cette raison, nous en parlerons ici, mais aussi et surtout dans la sous-section dédiée à la *communauté de coconstruction autogestionnaire*, sachant que les profils de certains individus peuvent parfois chevaucher plus d'une communauté.

Mentionnons donc les exemples d'accompagnement à la décision que le directeur de Géographie-Cités a mis en place dans sa carrière scientifique. Banos critique les projets européens du fait de leur séparation entre la recherche de base et ses « applications ». Il relate avoir toujours préféré plutôt travailler de manière directe avec les entreprises, pour résoudre des problèmes concrets ; cela « sans arriver avec une idée déjà très aboutie », pour éviter que les idées conseillées finissent « dans un carton » : « il faut que ça relève de la coconstruction »[2488]. Le géographe cite ainsi un travail mené en collaboration avec la RATP sur les déplacements des piétons à l'intérieur des stations de métro et notamment sur les échanges entre les plateformes, à savoir les quais et les trains. Pour maintenir l'interfaçage à un niveau « vraiment très simple », le géographe a opté pour maintenir le calcul en boîte noire mais de laisser une « fenêtre sur Netlogo[2489] », pour que les équipes de l'entreprise de transports puissent « réellement contribuer au processus » et pour qu'elles puissent voir en direct les effets systémiques à partir des choix pris dans la simulation[2490]. Pour Banos, la nature du code laissé en boîte noire relève de la responsabilité du modélisateur, dans la conviction que « tout ouvrir [signifie qu']on ouvre rien à personne »[2491]. Son argument est que le fait d'intégrer les non-modélisateurs dans le processus de modélisation, même si on fait l'économie d'une discussion sur le code, permet de créer de la confiance dans le modèle et de maintenir le juste équilibre entre implication et efficacité. Cette fenêtre Netlogo est de nature visuelle, car visuelles sont les compétences des équipes de la RATP quant au monitorage des flux piétons dans les stations. D'après Banos, la simulation a montré que la présence ou pas de certaines catégories sensibles – des touristes avec des valises ou des mamans avec des

[2486] *Ibid.*
[2487] *Ibid.*
[2488] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2489] Un logiciel bien connu de MBA.
[2490] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2491] *Ibid.*

poussettes – ne changent pas les frictions observées lors des heures de pointe. Pour fluidifier la circulation, il faudrait des aménagements coûteux et bureaucratiquement difficiles. Le modèle-simulation concocté par Banos est cependant utilisé par la RATP dans l'aménagement des quais, puisque, dit-il, des différences minimales peuvent avoir des effets sensibles[2492].

Michael Batty a des idées aussi claires que Banos, mais dans une tout autre perspective. En 2001, dans un article avec son collègue Paul Torrens, il écrivait ceci : « It is no longer possible to relegate complex systems models to non-policy contexts »[2493]. Les auteurs de cet article décrivent deux usages possibles des modèles : un usage prédictif et un usage pédagogique. Dans le deuxième cas, le modèle n'est pas censé être validé, car son but est d'être simplifié et générique afin de souligner certains aspects des systèmes en étude ou pour porter l'attention sur certains mécanismes considérés comme fondamentaux par les modélisateurs. Or, bien que dans cet article sur les limites de la prédiction les auteurs mentionnent, parmi d'autres problèmes, celui de l'équifinalité des modèles[2494], dans ses livres Batty prône une intervention des géographes et des urbanistes dans le développement des villes. Sa vision du rôle de la science par rapport aux pouvoirs décisionnels n'est pas différente de celle exprimée par Bettencourt, comme on peut le lire dans l'introduction à son manuel introductif à la géographie quantitative publié en 2005 : « [The ideas explained in this book] in and of themselves are necessary to inform decision making, for it is a consequence of the complexity approach that appropriate models should provide 'information' rather thant 'solutions', should 'inform' rather than 'solve' »[2495]. Dans son manuel de 2013, il réitère l'idée et accentue la suggestion selon laquelle ces techniques permettent d'explorer le futur des villes : « This is not a book that will tell you what the future city will be like or even how one might create better cities, but it will provide what I consider tools for and perspectives on a science that can be used to explore these futures »[2496]. Tout comme Bettencourt et West sont souvent les conseillers des administrations de villes qui se définissent ou qui se veulent « intelligentes », Batty se dirige à tous ceux et celles qui veulent rendre leurs villes « plus intelligentes » :

[2492] Pour complétude, il faut dire que d'autres membres de l'UMR que ce géographe dirige s'occupent, de manières diverses, d'aide à la décision : par exemple l'équipe du Centre de Recherches sur les Réseaux, l'Industrie et l'Aménagement (ou CRIA) « travaille de manière très étroite avec les décideurs, les entreprises, les collectivités territoriales, [et] fait beaucoup de bourses CIFRE », tandis que l'équipe Epistémologie et Histoire de la GéOgraphie (ou EHGO) s'occupe de la production de manuels pour l'enseignement supérieur et secondaire, sous le signe d'un rapprochement de la « demande sociale » quant au transfert des connaissances entre des univers « hiérarchisés et pyramidaux » et les citoyens et citoyennes à travers la pédagogie : entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.

[2493] Batty, M. & Torrens, P.M., « Modelling complexity », *op. cit.*

[2494] « In short, when one is able to generate let us say 200 different simulations of the development of Chicago using the same model but with different random number seeds, then what is the single limiting case ? How do we take an average of different cells developed in different runs of the same model ? » : Batty, M. & Torrens, P.M., « Modelling complexity », *op. cit.*

[2495] Batty, M., *Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractal*, Cambridge & London, MIT Press, 2005, p. XX.

[2496] Batty, M., *The New Science of Cities*, Cambridge & London, MIT Press, 2013, p. XVIII.

« Cities are becoming 'smart', and in many ways the kind of science reported here can inform how they might become 'smarter' »[2497]. Différemment par rapport à ses collègues du SFI et surtout par rapport au groupe de Pumain, Batty voit l'apport que le géographe quantitativiste peut donner aux décideurs de manière beaucoup plus structurée. En particulier, si la prise de décision est collective, il propose des modèles d'optimisation de la décision. Si l'esprit peut ressembler à celui qui est à l'œuvre dans la *communauté de la coconstruction autogestionnaire*, consistant à améliorer la qualité du processus décisionnel plus que de la décision en elle-même, en réalité Batty est en train de formaliser les approches collectives à la prise de décision à travers une série d'équations. Après avoir comparé deux approches, l'une normative et formalisée pour la décision individuelle et l'autre moins formelle pour la décision collective, il propose de dépasser le clivage à travers la prise en compte du collectif avec ses conflits, dont il faut optimiser la décision en mettant au point des outils pour expliciter et peser l'importance des buts de chacun :

> « By considering plan design as committee decision making, three issues that affect the traditional design-based approaches alluded to above are resolved. First, the idea of optimization as a collective (group) rather than just an individual characteristic must be defined, and this raises immediately the notion of conflict between individuals. Second, the process of group decision making must be related to the process of optimization, and third, the way in which groups or committees take account of or establish the importance (weight) of goals is made apparent »[2498].

Cette activité est sans doute la plus formelle parmi celles envisagées par les représentants de la *communauté de l'innovation libérale*, car elle prend appui dans la recherche opérationnelle, dans les mathématiques de l'optimisation et dans la théorie de la décision. Elle assume ensuite la forme d'équations de maximisation, d'état stationnaire ou de processus markoviens. La conviction de Batty est que, les processus de décision étant des processus d'apprentissage évolutifs, ceux et celles qui y prennent part peuvent finir par trouver des compromis et un consensus grâce à un principe général de convergence (*fitness*) :

> « At the heart of such models there is learning, and it is this that unites the real and the ideal, positive and normative, in that depending on one's perspective, the real can be interpreted as a process of reaching for the ideal, while design can be seen as a process in which ideals and norms are compromised in the move toward a consensus. In fact, learning is intrinsic to evolution, and many contemporary views

[2497] *Ibid.*, p. XIX.
[2498] *Ibid.*, p. 437.

of design stress how opinions and attitudes mutate as they evolve to some overall criterion of fitness that represents the quest to achieve certain norms and goals »[2499].

Imaginaire sociotechnique

L'*imaginaire sociotechnique* de ces groupes sociaux se rapproche de la vision hayékenne de la société. Le moteur de l'histoire des villes réside, selon eux (exception faite pour Banos), dans l'innovation sociale, technologique et économique, qui provient surtout du monde des entreprises. Dans cette optique, la politique est minimisée, voire encadrée dans des modèles d'optimisation. Ce cadre libéral se complète d'une aspiration pour la soutenabilité des villes, qui trouve son incarnation dans le concept de *smart cities* – nouveau modèle de ville, où tout est interconnecté et où les technologies informatiques gèrent de manière efficace les flux (d'informations, de transport, de déchets, etc.).

L'intérêt du SFI pour l'étude des villes s'est manifesté assez tôt, avec un groupe de recherche qui s'est constitué en 1991[2500]. Ni Geoffrey West ni Luis Bettencourt, ni les méthodes qui leur seront typiques, étaient encore présents à l'époque. C'est en 2004 qu'un workshop sur les villes est organisé dans le cadre d'un programme transversal sur la robustesse[2501]. Selon le bulletin du SFI, des urbanistes, des économistes, des géographes et des décideurs politiques se réunirent afin d'étudier l'innovation technologique et économique en termes spatiaux. À partir de la définition de robustesse, le niveau axiologique vient se greffer sur la métrologie discutée : on mesure la robustesse parce qu'on en fait un objectif souhaitable et on identifie l'innovation sociale et technique comme étant l'élément à même de pouvoir maintenir la viabilité des villes :

« Why would the study of 'robust cities' be a useful addition to the Program's scope ? To begin with, there is the sheer economic importance of cities : in most countries, the greatest portion of economic activity takes place in urban areas. […] The cramming of individuals, occupations, and industries into close quarters provides an environment in which ideas flow quickly from person to person […] Cities also provide a permissive social and cultural environment for the sort of 'experimenting' essential for innovation to take place. […] Understanding why some cities are robust – seeing robustness as a key determinant of long-term success or failure – is not only an intellectually engaging exercise, but also one rich in public policy implications. […] What are the social, political, administrative, cultural, technological, and economic characteristics of a city that facilitate innovative behavior on the part of its constituents (individuals and organizations) ?

[2499] *Ibid.*, p. 458.
[2500] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2, p. 31.
[2501] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1, p. 8.

Conversely, what are the attributes of a city's citizens that make a city innovative and robust ? »[2502].

Quatre ans plus tard, West et Bettencourt feront l'objet d'un article sur les bulletins du SFI, synthétisant l'un de leurs premiers efforts sur l'étude des villes. D'une part, après avoir rappelé que la croissance est vue comme un phénomène souhaitable, ils pointent la limite de la croissance des villes. Ils disent notamment que certaines des villes les plus peuplées au monde ont commencé à perdre plus d'habitants qu'elles n'en gagnent :

« From an economic perspective, a growing city is usually seen as a healthy one. […] But while growth can benefit a city's economy, a city's future is by no means ensured. According to the UNFPA State of World Population 2007 Report, there are actually more people moving out of Buenos Aires, Calcutta, Mexico City, São Paulo, and Seoul than are moving in »[2503].

Ensuite, les chercheurs énumèrent les trois régularités qu'ils observent à partir de leurs bases de données. D'après eux, les besoins de base, tels que le logement, l'électricité ou l'usage de l'eau, restent les mêmes, quelle que soit la ville prise en considération. Deuxièmement, les infrastructures n'augmentent pas au même rythme que la démographie, du fait des économies d'échelle : plus de personnes peuvent utiliser un nombre réduit d'infrastructures. Troisièmement, si des villes plus grandes peuvent baisser l'investissement per capita à l'égard des infrastructures, les phénomènes sociaux, comme l'innovation, l'éducation, l'art ou comme les maladies et la criminalité, augmentent en revanche avec un rythme plus soutenu. Une fois ces données présentées, les chercheurs accordent aux villes la possibilité de croître à l'infini, à condition que le taux d'innovation suive le rythme de croissance démographique :

« The superlinear growth rates also suggest that a city can grow indefinitely. When the researchers plugged the scaling exponents into an urban growth equation, they found that cities driven by economies of scale were destined to plateau, whereas those driven by innovation or wealth creation had the potential for unbounded growth. 'Should a city have a finite size or should it grow forever ? How should it grow ? You would argue about it forever if you hadn't measured', Bettencourt says »[2504].

[2502] *Ibid.*, p. 9.
[2503] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 6.
[2504] *Ibid.*, p. 8.

Comment est-ce que, d'après eux, cette croissance infinie peut avoir lieu ? Leurs résultats scientifiques s'accordent avec les théories économiques classiques qui postulent la possibilité et la nécessité d'une croissance infinie, atteignable par l'encouragement de l'innovation et de la concurrence :

> « To grow indefinitely, a city has to periodically reset its growth rate. Such 'resetting' can come from innovations that revitalize the economy, or from outside factors, such as shifts in immigration. The pattern that an ever-growing city falls into is one of successive growth cycles – each one shorter than the last as the size of the city increases. 'You're on this treadmill and you've got to go on making these changes, these innovative changes, faster and faster because if you don't you'll stagnate and collapse', West says »[2505].

La croissance des villes est traitée mathématiquement dans l'un des articles de ces chercheurs. Elle prend l'allure visible dans la fig. 22 qui illustre l'équation 3, censée donner la solution à une autre équation plus générale, qui sert à calculer le taux de croissance urbaine. La variable intéressante est représentée par le β, dont les implications sont expliquées dans la fig. 23.

$$N(t) = \left[\frac{Y_0}{R} + \left(N^{1-\beta}(0) - \frac{Y_0}{R}\right)\exp\left[-\frac{R}{E}(1-\beta)t\right]\right]^{\frac{1}{1-\beta}}. \qquad [3]$$

Figure 22. Équation du taux de croissance urbaine. Image tirée de Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. & West, G.B., « Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities », PNAS, 2007, vol. 104, n. 17, p. 7304

Table 2. Classification of scaling exponents for urban properties and their implications for growth

Scaling exponent	Driving force	Organization	Growth
$\beta < 1$	Optimization, efficiency	Biological	Sigmoidal: long-term population limit
$\beta > 1$	Creation of information, wealth and resources	Sociological	Boom/collapse: finite-time singularity/unbounded growth; accelerating growth rates/discontinuities
$\beta = 1$	Individual maintenance	Individual	Exponential

Figure 23. Explication de la variable β. Image tirée de Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. & West, G.B., « Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities », PNAS, 2007, vol. 104, n. 17, p. 7305

Selon ce graphe, si la croissance suit la logique « biologique », plus qu'économique, des économies d'échelle, donc de l'optimisation et de l'efficience (le β étant dans ce cas inférieur à un), le taux démographique de la ville tend vers un plateau où il cesse de croître. Si par contre elle suit une logique « sociologique » de création de l'information, de la richesse et des ressources, sa croissance peut se briser ou exploser de manière illimitée (le β étant dans ce cas supérieur à un). Ces éléments portent les

[2505] *Ibid.*

chercheurs à conclure que s'il n'y a pas de croissance dans le taux des innovations – amenant à plus d'information, de richesse et de ressources – la croissance démographique illimitée devient insoutenable :

> « To avoid this crisis and subsequent collapse, major qualitative changes must occur which effectively reset the initial conditions and parameters of Eq. 3. Thus, to maintain growth, the response must be 'innovative' to ensure that the predominant dynamic of the city remains in the 'wealth and knowledge creation' phase »[2506].

Ces équations mathématiques montrent, selon les auteurs, qu'« en principe » il n'y a pas de limites à la taille d'une ville, ce qui contredirait les idées classiques sur l'économie urbaine :

> « Although population increases are ultimately limited by impacts on the natural environment, we have shown that growth driven by innovation implies, in principle, no limit to the size of a city, providing a quantitative argument against classical ideas in urban economics »[2507].

Même si le passage précédent contient une mention aux limites naturelles et physiques, le véritable problème, selon West et Bettencourt, réside dans le rythme de l'innovation de la société, rythme qui devrait être de plus en plus rapide pour avoir un « reset » du cycle de croissance des villes : « Thus, to sustain continued growth, major innovations or adaptations must arise at an accelerated rate »[2508]. L'économiste et géophysicien Pierre Matarasso a montré comment l'introduction d'une formule mathématique par John von Neumann en économie a conforté scientifiquement l'idéal d'une croissance sans fin : l'« horizon infini » est devenu ainsi paradigmatique dans ce domaine des savoirs[2509]. Vieille-Blanchard remarquait, à propos du modèle de William Nordhaus, qu'« il était *a priori* peu probable que les conclusions de ses simulations s'opposent à la croissance », parce qu'il se basait sur le modèle de la « croissance optimale » de Franck Ramsey[2510], qui intègre justement la formule mathématique de croissance infinie de von Neumann. De même, nous pouvons remarquer que les équations mathématiques utilisées par West et Bettencourt favorisent un certain scénario plutôt qu'un autre, de par les présupposés épistémiques et axiologiques qui y sont inscrits dès le départ.

[2506] Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. & West, G.B., « Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities », *PNAS*, 2007, vol. 104, n. 17, p. 7304.
[2507] *Ibid.*, pp. 7305-7306.
[2508] *Ibid.*, p. 7305.
[2509] Matarasso, P., « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrée : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission », dans Dahan Dalmedico, A. (ed.), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007, p. 54.
[2510] Vieille-Blanchard, E., « Croissance ou stabilité ? », *op. cit.*, p. 38.

Dans le bulletin du SFI de 2009, l'équipe éditoriale publie la lettre d'un lecteur qui relève une contradiction dans le discours des physiciens-géographes. Le décalage logique serait, selon ce lecteur, entre la première affirmation concernant le flux démographique en sortie des grandes villes et la deuxième affirmation selon laquelle les villes peuvent croître à l'infini. Ensuite, le lecteur tisse l'éloge de l'un des livres du mouvement de la décroissance, *Small is Beautiful* de Michael Schumacher :

> « Despite being an optimist, I still feel mildly queasy when the researchers suggest that cities can 'grow indefinitely' through innovation or wealth creation. As the article noted, by 2007 Buenos Aires, Calcutta, Mexico City, and São Paulo were losing, not gaining, population. *The Economist* provided a potential answer when it averred that such cities rise 'fast until they [make] up about a quarter of their countries' population, then [stabilize] when the country's income hits about $5,000 per person'. Alas, all growth rates must flag, in spite of Viagra-like innovations. I, for one, after living over five years in both New York and São Paulo, with metro areas around 19 million, moved to a colonial town of 7,000 inhabitants in the interior of Brazil, adding to São Paulo's exodus. Small can still be beautiful, depending on who's looking at it »[2511].

Interrogé sur le courant de la décroissance, West affirme ne pas le connaître : « I know the theory of growth but not de-growth »[2512]. Lorsque le discours porte sur la croissance démographique, le géographe quantitativiste attaque Malthus, qui mettait en garde contre le collapse démographique mondial, et les économistes en général, y compris ceux derrière le modèle World, pour ne pas avoir compris que la variable réellement importante était l'innovation. D'après West, les modèles économiques qui suggèrent la possibilité d'une croissance démographique illimitée, sans prendre en compte la variable de l'innovation, relèvent de la foi : « Magic, it's like a mantra. It's like believing that Jesus Christ will intervene. Well I mean it's a faith. […] And it is innovation that in fact keeps up with the growth of the population so that you do innovate yourself out there »[2513]. Dans la théorie de West et Bettencourt, l'innovation, par exemple celle de la récente révolution industrielle digitale, permet un « reset » de la courbe de croissance, au sens où elle permet au système économique de redémarrer. En effet, si dans l'optique des deux géographes quantitativistes l'administration politique est partiellement vidée de son pouvoir d'infléchir le cours des événements, de l'autre côté le monde entrepreneurial et celui de l'innovation sociale y sont investis de la responsabilité d'assurer le changement nécessaire pour éviter l'effondrement des villes. Ce qui préoccupe West, c'est que le taux de croissance démographique aujourd'hui procède si rapidement que la prochaine révolution industrielle devrait

[2511] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24, p. 5.
[2512] Entretien avec Geoffrey West, 28.09.16.
[2513] *Ibid.*

arriver vers 2025, faute de quoi on risque le collapse. D'après lui, il n'y a pas suffisamment d'efforts mis sur ce nouveau cycle d'innovations pour éviter un tel scénario catastrophique :

> « if you intervene before the collapse by making an innovation, what you are effectively doing is re-setting the clock. […] So that's the good side. […] then unfortunately what happens is that going along with that increased connectivity, there is an increase of the pace of life, everything gets faster every time when you grow. […] these innovations have to come together faster and faster. So something that might have taken one hundred years to develop one hundred years ago now has to take fifteen years and soon it's going to have to take ten. […] My concern is that […] in principle we can stop a collapse. It's that we haven't left enough time »[2514].

West se demande ensuite si un monde avec une bonne qualité de vie et une innovation constante soit possible dans un contexte de croissance nulle, et répond qu'il ne connaît pas la réponse. Il regrette en outre le fait que personne ne puisse répondre à cette question : « what is it we should be doing ? I don't know what we should be doing. […] can we have the kind of quality and standard of living, exciting ideas and innovation without growth ? […] I mean no one is looking at how that can work »[2515].
La conclusion du physicien-géographe est « pessimiste » en ce qui concerne le futur de la planète, pessimisme qui repose sur une métaphysique de l'humain qui le décrit comme intrinsèquement vorace : « So there is some kind of human law that goes from hunters and gatherers to… […] I have been led to the very naïve conclusion that the fundamentally driving force is greed or the desire to want more. Greed is a nasty way of saying it. Most people want more »[2516].
Bettencourt est d'un avis contraire : « I'm much more optimistic than, say, Geoffrey I think »[2517]. Le géographe considère que le problème n'est pas le fait qu'on utilise beaucoup trop d'énergie, mais qu'on la produit de la mauvaise façon : « energy we use has a lot of emissions, so if you got all your energy from the sun no problem », et qu'on l'utilise de manière inefficiente : « there are all kind of inefficiencies. […] But if you get it directly from the sun […] you have a whole chain of inefficiencies that you have bypassed »[2518]. Selon Bettencourt la transition vers les énergies renouvelables est déjà en acte et elle court vite, donc le problème du changement climatique sera bientôt réglé, sans pour autant que l'on doive renoncer à nos niveaux de consommation actuels : « the question is whether they're developing fast enough : they are developing very fast. And so there's certainly a path there where the energy use problem goes

[2514] *Ibid.*
[2515] *Ibid.*
[2516] *Ibid.*
[2517] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.
[2518] *Ibid.*

away in terms of climate change »[2519]. En outre, à contrecourant de la plupart des récits en circulation concernant l'avenir de l'humanité, le chercheur du SFI pense même qu'on aura plus d'énergie que ce qu'il nous faudra : « and yet you can even consume more energy, in fact there will be a world where energy will be so cheap, much cheaper than it is even today, that you have to start thinking of how to use the energy »[2520]. Ceci entraînera, d'après Bettencourt, d'autres comportements vertueux, tel que le recyclage, pratique fondamentale, dit-il, afin de composer avec la rareté des métaux. Le physicien-géographe affirme ne pas nier les problèmes auxquels les peuples du monde font face aujourd'hui, ce qui le rassure c'est la conscience croissante que les personnes et les villes ont de ces problèmes : « it's not that we don't have a problem, of course we do, but increasingly we are aware of it and the pace of the solution is actually now very fast »[2521]. Un des arguments qu'il allègue concerne les plans de dé-carbonisation que de plus en plus d'agglomérats urbains du monde souscrivent et entament. Pour Bettencourt, un exemple de ville où les flux ont été bien dirigés pour devenir « efficients » serait Tokyo, jugée une ville « moderne » et « industrielle » mais « soutenable » et « agréable » à vivre, tandis qu'un exemple repoussoir est représenté par Detroit, où des phénomènes de ségrégation économique et raciale ont affaibli la ville même avant le collapse qu'elle a subi depuis la disparition de l'industrie automobile[2522]. En somme, le paradigme de soutenabilité que suivent West et Bettencourt s'inscrit dans le cadre de la *green economy* et des *smart cities*.

Bettencourt qualifie de politique son travail de conseil uniquement en raison de l'objectif ultime qui fonde sa démarche, objectif qui concerne ce qu'il appelle « the big frame of choices »[2523] (autre nom pour idéologie ou pour *imaginaire sociotechnique*) et qu'il juge « consensuel » :

> « It's a bit like liberalism with a big L, not the political liberalism, but the idea that we should create societies which have a lot of choice and agency and a lot of their basic needs are taken care of and that […] the pursuit of happiness is a fundamental right of everybody. You can say that that's political but I think it's also quite consensual in terms of that being a good thing and that science can tell you a little bit about the conditions that generate more that than others »[2524].

Bettencourt juge comme antilibéral le fait de forcer certaines personnes à renoncer à des biens ou des ressources au nom de la préservation de la planète : « I think it's harder as a statement to say that everyone should live like us and that is the only

[2519] *Ibid.*
[2520] *Ibid.*
[2521] *Ibid.*
[2522] *Ibid.*
[2523] *Ibid.*
[2524] *Ibid.*

solution »[2525]. Il préfère exprimer sa fascination vis-à-vis de la multiplicité de solutions qui peuvent paraître dans un monde dans lequel tout individu peut trouver son chemin et mettre en place sa propre solution :

> « typically in complex systems [there is] not [a unique] solution and I think there's joy in understanding all the solutions that can be in having choice and agency to go back to that instead of having everybody having to behave in the same way in a way that at least for some people be constraining »[2526].

Denise Pumain est, sur ce point, fondamentalement d'accord avec ses collègues basés aux États-Unis, comme l'atteste ce passage tiré d'un de ses articles programmatiques sur le besoin d'une théorie évolutive des villes :

> « Si le mécanisme essentiel qui régit la forme du système des villes est celui de la concurrence entre les unités géographiques qui le composent, pour capter et accumuler le produit de ressources diverses, et si le jeu de cette concurrence est permis par la circulation de l'information entre des unités qui se mettent ainsi en réseau, il reste que le moteur de l'évolution est la création continue de nouveauté et de richesses dans le système »[2527].

Dans cette optique, l'innovation est vu comme le moteur de l'évolution des villes :

> « il est très difficile de prendre en compte dans les modèles inspirés des systèmes physiques le phénomène essentiel de l'innovation. Non seulement celle-ci dans les systèmes de villes est très largement endogène, mais, par le renouvellement permanent qu'elle induit, elle prend une importance primordiale dans la genèse de la structure du système, par diversification et complexification de ses éléments »[2528].

Dans cette géographie quantitative, le primat n'est pas à la biologie mais à la physique et à l'économie : « Il n'est pas sûr cependant, ajoute Pumain, que l'innovation sociale, avec les processus d'apprentissage et de concertation qu'elle implique, puisse se modéliser tout à fait comme un phénomène d'ordre biologique »[2529]. À l'époque de cet article, Pumain imagine que les modèles numériques futurs devront plutôt intégrer une dimension cognitive comme facteur d'apparition, de sélection et de régulation de l'innovation. À l'heure d'aujourd'hui, le groupe de Pumain n'a pas encore intégré de telles variables. L'une de ses doctorants, Cottineau, a repéré comme variables

[2525] *Ibid.*
[2526] *Ibid.*
[2527] Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*, p. 126.
[2528] *Ibid.*
[2529] *Ibid.*, p. 127.

pertinentes, pour son travail de thèse sur l'évolution de deux mille villes russes, des fonctions territoriales, des fonctions économiques et des fonctions spécialisées telles que l'extraction de ressources, la présence d'industries ou la présence de transports :

> « The most generic urban functions range from territorial functions (control over a political territory) to central functions (provision of goods and services to nearby populations) and specialised functions (resource extraction, industry, transport, etc.). We collected information characterising cities functionally : the status of the capital city, the specialisation into a single industry, access to railways and airports, the presence of accessible resources (coal, oil and gas […]) »[2530]

Par ailleurs, l'idée du « reset » promue dans les années 2000 par West et Bettencourt, on la retrouve déjà dans l'article de Pumain de 1997 :

> « Loin de restreindre le volume de la population et des activités urbaines comme dans un modèle biologique d'interaction proie-prédateur, la concurrence interurbaine n'est pas un jeu à somme nulle et, parce qu'elle suscite l'innovation, conduit à repousser continuellement les facteurs susceptibles de limiter l'expansion des villes »[2531].

Comme le « reset » était inscrit dans les équations de West et Bettencourt, la centralité de l'innovation dans les processus sociaux est inscrite dans les modèles de Géographie-Cités également. Une représentation graphique symbolique d'une implémentation informatique de la théorie de Pumain (fig. 24), graphe tiré de la thèse de Sébastien Rey-Coyrehourcq, montre comment l'innovation est traitée : comme un objet d'échange entre les villes.
La figure F montre un diagramme qui donne plus de détails à propos du fonctionnement informatique du processus d'innovation dans le MBA. On y voit la représentation d'une boucle dans laquelle la croissance de la population d'une série de villes groupées est liée à la création, à l'application et à la diffusion des innovations à l'intérieur de ce *cluster* de villes, qui peut être à son tour connecté à d'autres groupes de villes.

[2530] Cottineau, C., « A Multilevel Portrait of Shrinking Urban Russia », *Espace, populations, sociétés*, 2015-2016, n. 3 & n. 1.
[2531] Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*, p. 129.

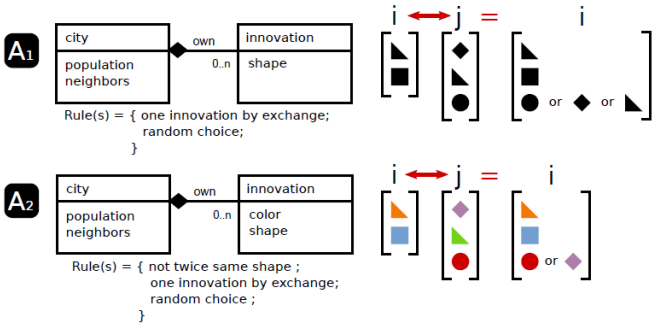


Figure 2.11 –

Présentations des implémentations et des inter-dépendances entre ces implémentations dans le cas des deux familles d'hypothèses $A = \{A_1, A_2\}$ et $B = \{B_1, B_2\}$

(a) Les versions A_1 et A_2 mobilisent chacune des règles très différentes pour définir la règle de sélection et d'intégration de l'objet innovation échangé entre deux villes i et j. La couleur est en effet introduite comme une nouvelle propriété des innovations dans la deuxième version A_2 de cette hypothèse A.

Figure 24. Dans le MBA de Sébastien Rey-Coyrehourcq l'innovation est traitée comme un objet que les villes peuvent s'échanger. Graphe tiré de Rey-Coyrehourcq, S., Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie, 2015, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne, p. 182

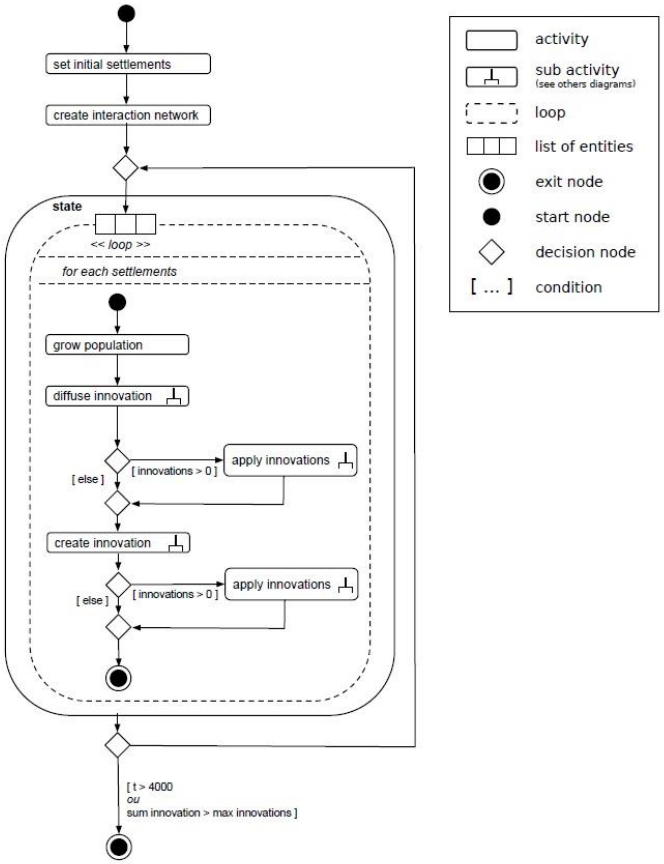


Figure C.5 –

Diagramme d'activité principal

Figure 25. Dans le modèle de Sébastien Rey-Coyrehourcq, la croissance des villes est strictement liée à la fonction « innovation ». Gaphe tiré de Rey-Coyrehourcq, S., Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie, 2015, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne, Annexe, p. 79

La fig. 25 rentre dans les détails du fonctionnement interne des sous-parties de ce premier diagramme, faisant figurer notamment les mécanismes de création, d'application et de diffusion des innovations. Des trois, le mécanisme le plus

intéressant pour y déceler un autre aspect de l'*imaginaire sociotechnique* de cette *communauté de l'innovation libérale* est la fonction « *filter innovations* », qui est une sous-partie du mécanisme de la diffusion des innovations (dont le diagramme n'est pas reproduit ici). Ce mécanisme est intéressant parce qu'il simule une concurrence et une sélection naturelle des innovations produites par les villes. Une fois que le programme a pu comparer une innovation à la liste des autres innovations, et après en avoir testé la longévité, soit il promeut l'innovation pour la diffuser, soit il l'efface de la liste.

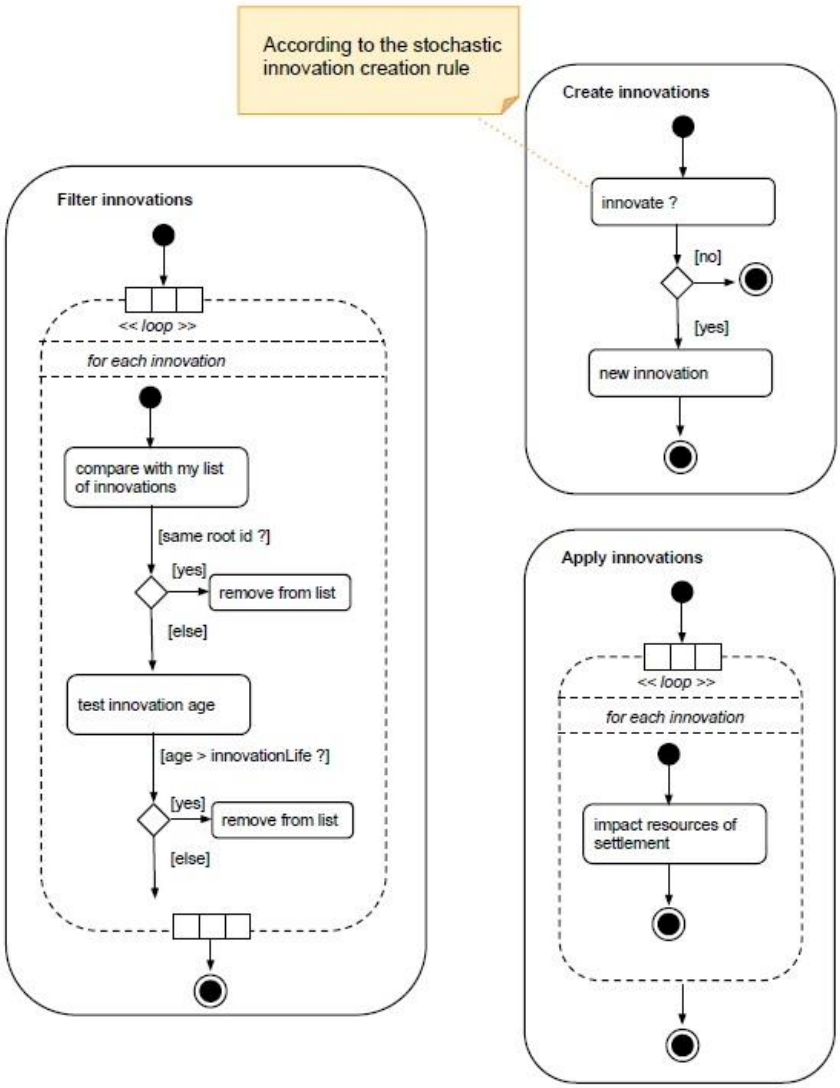


Figure C.6 –
Diagramme d'activité pour la gestion des innovations

Figure 26. Fonctionnement des sous-parties de la fonction « innovation » dans le modèle de Sébastien Rey-Coyrehourcq. Tiré de Rey-Coyrehourcq, S., Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie, 2015, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne, Annexe, p. 80

On a dit que cette communauté est la plus diversifiée. Il suffit en effet de comparer la posture que Pumain et Batty tiennent par rapport aux *smart cities*. D'une part, la géographe française en a surtout une connaissance théorique, car elle n'a jamais

participé à des projets de gestion de villes intelligentes ; en outre, elle en garde un jugement distant et relativisé :

> « Certes, les bouleversements sont énormes ! Mais pour moi, du point de vue de la théorie évolutive des villes, il s'agit surtout de l'innovation du moment, à laquelle toutes les villes s'adaptent peu ou prou, rapidement ou avec retard, comme pour n'importe quelle autre innovation l'ayant précédée (le chemin de fer, le gaz, l'exode rural, la croissance rapide, les zones industrielles, les campus, les technopoles, la grande vitesse et les aéroports, le tourisme, etc.). La particularité est que cette fois l'innovation s'est propagée très vite, elle est multiforme et presque omniprésente mais elle est 'banale', c'est-à-dire qu'elle ne contribuera guère à spécialiser certaines villes (même si elles se proclament intelligentes). C'est une innovation disruptive dans chaque secteur, mais incrémentale quand on compare les villes les unes aux autres. Elle a été beaucoup appuyée par les entreprises *high tech*, elle a parfois suscité dans les collectivités territoriales des initiatives performatrices, mais les ouvertures vers un élargissement des participations citoyennes restent beaucoup plus difficiles, même si en principe tous les habitants sont concernés »[2532].

Batty, quant à lui, refuse toute politique centralisatrice du développement des villes, qui rappellerait la planification socialiste. Il prône, avec l'urbaniste américaine Jane Jacobs, « une culture où la planification et le design émergent de manière ascendante, où les individus sont à contact avec les problèmes de la ville et connaissent bien comment y faire face : une planification et un design qui soient fortement décentralisés »[2533]. Comme ses collègues de Géographie-Cités et du SFI, il pense que les villes abritent l'innovation : « Cities admit innovation – indeed they are the crucibles of innovation ; they generate surprise ; they display catastrophes »[2534]. Comme ses collègues du SFI, il est un soutien du mouvement des *smart cities*, qu'il qualifie de « compétitives » et d'« égalitaires » dans un article programmatique écrit à plusieurs[2535]. Il y soutient en outre que les villes intelligentes, voire « sensibles », peuvent améliorer l'efficience, l'égalité et la qualité de la vie de leurs habitants. Dans l'éditorial d'un numéro d'une revue d'aménagement du territoire, Batty considère que les villes intelligentes peuvent être fortement disruptives dans la configuration des marchés et cite l'exemple d'Uber, pour lui l'épitomé de la destruction créatrice de Schumpeter[2536]. Enfin, dans un commentaire publié sur une revue de géographie, Batty

[2532] Mail de Denise Pumain, 25.07.18.
[2533] Batty, M., *Cities and Complexity*, *op. cit.*, p. 2.
[2534] Batty, M., *The New Science of Cities*, Cambridge & London, MIT Press, 2013, p. 25.
[2535] Batty, M., Axhausen, K.W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G. & Portugali, Y., « Smart cities of the future », *The European Physical Journal Special Topics*, 2012, n. 214, pp. 481-518.
[2536] Batty, M., « How disruptive is the smart cities movement ? », *Environment and Planning B : Planning and Design*, 2016, vol. 43, n. 3, pp. 441-443.

tisse l'éloge de l'usage des *Big Data* produites par les *smart cities* en ce qu'elles permettent en termes de planification et de surveillance urbaine[2537].
Toutefois, dans la vaste majorité des cas, Batty propose des modélisations mathématiques ou informatiques fortement basées sur l'étude géométrique de l'espace ou sur l'analyse des flux. Dans de telles modélisations, il est souvent question de « flux symétriques » ou de « flux asymétriques », de « volumes », de « syntaxes d'espaces » dans des graphes, de « hiérarchies de composition de fractales » plus que d'innovation, démographie, transports ou marchés économiques. Ses modèles résultent les plus abstraits de ceux qui sont produits par l'ensemble de nos interviewés en géographie quantitative. Les rares modèles économiques que nous avons repérés dans les livres du chercheur britannique renvoient à l'économie néoclassique. Comme ce courant intellectuel et idéologique des sciences économiques l'impose, les marchés modélisés par Batty aboutissent toujours à un équilibre. L'urbaniste résume en effet les fondements de cette théorie de la manière suivante :

> « The well-known model of economic exchange is predicated on the assumption that individual actors increase their overall utilities or levels of satisfaction by trading commodities they have control over for other commodities they desire but that are held by different actors. This theory assumes the existence of a general economic equilibrium in which the process of trade or exchange is essential for market clearing and for an efficient allocation of resources »[2538].

C'est à l'équilibre du marché que les équations de Batty mènent également, comme le montre la fig. 27, qui représente une équation de conservation, provenant de la physique, dans laquelle une quantité donnée (normalement la masse, la charge, l'énergie, mais ici une quantité de biens ou de ressources) est conservée dans le temps au fur et à mesure de son déplacement.

Onto-épistémologie

Varenne écrit qu'il existe trois manières d'entendre le rapport entre géographie et culture : soit l'on est déterministes et l'on pense que les faits géographiques sont majoritairement dominés par les conditions naturelles de l'environnement ; soit l'on est pour un volontarisme culturel, qui domine sur les faits de nature ; soit l'on est « possibilistes », au sens où les êtres humains ont une marge de manœuvre dans un paysage avec des contraintes[2539]. Les chercheurs et chercheuses appartenant à la *communauté de l'innovation libérale* sont possibilistes.

[2537] Batty, M., « Big data, smart cities and city planning », *Dialogues in Human Geography*, 2013, vol. 3, n. 3, pp. 274-279.
[2538] Batty, M., *The New Science of Cities*, *op. cit.*, p. 413.
[2539] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.*, pp. 27-28.

The total money M associated with these investments is given by the general conservation equations

$$\sum_j r_j^d = \sum_i r_i^d = \sum_k v_k^c = \sum_k v_k^d = \sum_k \sum_j \hat{C}_{kj} = \sum_i \sum_k \hat{X}_{ik} = M. \quad (13.3)$$

An equilibrium defined in terms of an equal exchange is defined in terms of the coincidence of actual and desired ownership—interest and control—where the two flow matrices are identical, that is

$$\hat{C}_{kj} = \hat{X}_{ik}\,, \quad i = j, \quad (13.4)$$

from which equal resource and value vectors are defined as

$$\left.\begin{aligned} r_i &= r_i^c = r_i^d \\ v_k &= v_k^c = v_k^d \end{aligned}\right\}. \quad (13.5)$$

Exchange will therefore only occur if there is a mismatch between actual and desired resource allocations, and in such a case $\hat{C}_{kj}$ and $\hat{X}_{ik}$ will adjust so that eventually equations (13.4) and (13.5) are satisfied.

Figure 27. Équations néoclassiques de l'équilibre du marché, en l'occurrence du marché de biens immobiliers. Image tirée de Batty, M., The New Science of Cities, Cambridge & London, MIT Press, 2013, p. 417

Bettencourt se démarque des courants que Varenne classerait dans le « volontarisme culturel » en soulignant leur aspect « moins analytique ». Il se réfère à la géographie culturelle ou aux courants postmodernes, avec lesquels il témoigne d'une certaine difficulté à établir une entente :

> « Cultural Geography […] is more sort of a postmodern version of Anthropology. And those people tend to associate space with cultural values and traditions and stuff. So those people I don't talk about to and they are a little less analytical. It's interesting in some ways. But it's more difficult to talk to them »[2540].

La position postmoderne est définie par Bettencourt comme une position qui abandonne les cadres théoriques solides pour insister sur la relativité culturelle. Cette dimension n'est pas niée par le physicien-géographe. Cependant, ce dernier tend à mettre l'accent sur la prédictibilité des comportements humains, sans pour autant remettre en cause le libre arbitre :

> « About free will […] there's a big confusion […] [Complex systems approach] […] only says that on some very large average involving millions of people and many places, there's a logic to like let's say how cities are put together, how dense they are, how they use space. […] it doesn't mean that you cannot go and do whatever tomorrow. It just means that as everyone is doing exactly that, there is some bigger thing that emerges which is how people interact with each other »[2541].

[2540] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.
[2541] *Ibid.*

Selon Bettencourt, les contraintes spatiales, infrastructurelles, énergétiques et physiques sont les éléments qui rendent les phénomènes des villes partiellement prédictibles, à savoir quantifiables et nomothétiques, tout en admettant le libre arbitre des individus : « the fact that you have to exist in space doesn't remove your free will »[2542]. Dans une brochure du SFI, le chercheur est encore plus explicite : « Despite each of us having free will, on average we are quite predictable : insurance companies and casinos have long made good business of knowing these odds »[2543]. Si d'une part les chercheurs du SFI accordent une certaine importance aux administrations, au service desquelles ils n'hésitent pas à mettre leur expertise, d'autre part ils affirment que l'essentiel du développement d'une ville est prédéterminé : « My interpretation, explique West, is that where that cycle ends up might depend upon whether you have a city with a good administration in place, but the general trend and the coarse-grained scale of it is probably determined for you »[2544]. Dans les recherches des deux physiciens-géographes, les différences culturelles, historiques et politiques jouent donc un rôle secondaire par rapport à des contraintes d'ordre matériel et physique, y compris environnementales. Ou alors le social y est déterminé comme le sont les particules des gaz dans une modélisation de physique statistique. Leur conviction de fond est que leurs méthodes mathématiques et computationnelles sont plus intéressantes et performantes que celles classiques des SHS (y compris l'économie). Bettencourt explique que le manque de mention des paradigmes classiques des SHS dans ses *talks* peut faire penser à ses auditoires plus traditionnels qu'il ne connaisse pas suffisamment les disciplines auxquelles, en tant que physicien converti, il se propose de contribuer :

> « *Question :* Do you ever get in the States or in Europe some sort of criticism from more traditional geographers saying you cannot model [cities and societies] ?
> *Bettencourt :* Sure. You always get all that question and it's not just the geographers. Could be everyone that thinks that. So you always get the argument […], 'You don't know enough about geography or economics or sociology or something'. I think that on a longer conversation you can even convince them that you do, but it's even worse, because you actually convince them that you do know and you did not use that because you know it wasn't good. So you have to be careful as to how you deal with that »[2545].

Les critiques que les géographes quantitativistes reçoivent des collègues, notamment de ceux et de celles qui attribuent une plus grande importance aux éléments culturels,

[2542] *Ibid.*
[2543] SFI, « Reflections on Risks, Radicals, and Rewards », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
[2544] SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1, p. 8.
[2545] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.

au libre arbitre et à la politique, portent sur l'activité de modélisation elle-même, plus que sur le nombre ou la nature des connaissances mobilisées. Ces techniques de modélisation – que cela soit les lois de puissance ou les MBA – sont souvent critiquées de véhiculer des visions réductionnistes, déterministes ou positivistes, ou bien d'être incomplètes, irréalistes et difficilement vérifiables[2546]. Un exemple éloquent pour la France on le trouve dans le témoignage d'Elise Beck :

> « *Question :* Vous recevez des critiques sur vos méthodes de modélisation lors des colloques ? Quel type de critiques ?
> *Beck :* Ben oui : 'La modélisation c'est une simplification du monde', 'Le système que vous modélisez est beaucoup trop complexe justement pour pouvoir être réduit à ce que vous en représentez' ; 'À quoi ça sert' ; 'Comment vous validez' ? Parfois on a des difficultés à valider, du coup 'ça sert à rien'. […] [On reçoit ces critiques] [m]ême pas uniquement dans les colloques, hein »[2547].

Pumain est également possibiliste, comme l'atteste par exemple ce passage d'un de ses articles sur la nécessité de mettre au point des théories dynamiques et évolutives des villes, pour se démarquer des théories précédentes jugées trop statiques : « Une théorie évolutive n'est pas une théorie historique : il ne s'agit pas de prendre en compte tout l'histoire des villes, ni de reconstituer une genèse dans ce qu'elle a d'unique »[2548]. Mais les régularités priment sur la « personnalité des acteurs » :

> « En dépit de la diversité de la personnalité des acteurs, de leurs motivations et de leurs actions, l'agrégation de leur comportement produit des régularités, souvent indépendantes des finalités qu'ils se sont assignées, et qui peuvent être analysées au niveau de l'évolution d'une ville comme de celle du système des villes, assorties d'un facteur 'aléatoire', d'un degré d'imprévisibilité d'importance variable qui correspond à l'ignorance dans laquelle on se trouve des décisions prises par les acteurs »[2549].

Pour la géographe française, ce qui relève de « décisions individuelles improvisées » demeure imprédictible : « si la plupart des gens se meut à l'intérieur de choix plus ou moins rationnels, il reste toujours une part de fantaisie qui leur est propre »[2550]. Comme exemples de la manifestation du libre arbitre politique dans la gestion d'une ville, elle cite l'installation de Peugeot à Sochaux ou bien « le succès du festival de

[2546] Voir par exemple George, P., « Difficultés et incertitudes de la géographie », *op. cit.*
[2547] Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.
[2548] Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*, p. 120.
[2549] *Ibid.*, p. 131.
[2550] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.

musique de Marciac, qui a revitalisé le village […] alors que c'est une situation très improbable en fréquence »[2551].
L'économiste et géographe Antonio Ignazzi, ex-doctorant de Pumain, souligne également cet aspect avec un exemple qu'avait rencontré Clémentine Cottineau dans sa thèse, à savoir la fondation de Saint Petersburg :

> « Le problème est qu'avec ces modèles tu dois considérer quelque chose que l'ordinateur n'est pas capable de décrire : l'Histoire. […] Qui pouvait savoir qu'un tzar un jour allait décider de construire de but en blanc la ville de Saint Petersburg ? Tu ne peux pas simuler cela »[2552].

Tout en considérant l'utilité de ce genre de modélisations, Ignazzi témoigne d'un débat interne au groupe de Pumain concernant la thématique de la contingence historique. Les modèles de la famille SimPop sont en effet conçus pour simuler les flux économiques, technologiques et démographiques entre villes existantes et en interrelation. Par définition, ces MBA ne peuvent pas simuler l'apparition d'une nouvelle ville.
Quasiment tous les individus afférents à cette communauté partagent une vision onto-épistémologique *structuraliste*. Pour eux, la simulation décrit l'essentiel des systèmes réels et peut constituer, au moins à terme, une preuve du fonctionnement véritable des villes. Une telle posture mène à un certain usage des simulations.

Performativité de la simulation

Cette section traite de ce que les scientifiques pensent pouvoir faire avec, ou faire faire à leurs modèles et simulations numériques. Par exemple, une sphère sémantique qui revient souvent chez les *structuralistes* est celle liée à la « reproduction » : les simulations, d'après eux, reproduisent les comportements des systèmes réels, la preuve en étant l'homologie formelle et quantitative entre les *patterns* statistiques décrivant les systèmes réels et les *patterns* statistiques issus des simulations numériques de ces mêmes systèmes réels. Ce point est important car il a des répercussions sur les *engagements épistémiques* des scientifiques, sur leurs postures vis-à-vis des décideurs politiques, des ONG et des entreprises, ainsi que sur l'attitude que ces derniers vont assumer face aux chercheurs et aux chercheuses.
West et Bettencourt ne font jamais usage du terme « scénario », ni dans la production scientifique ni dans leur travail de conseil : « There's a bit of a danger [in] doing scenarios […] that's already too constraining […] it's already a downstream reality from a certain level of understanding, so that's why we have to be careful with

[2551] *Ibid.*
[2552] Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.

that »[2553]. Il s'agit pour eux plutôt d'indiquer quels futurs leurs données les amènent à juger comme fermés, afin de montrer par contraste les possibles chemins à parcourir :

> « 'Humans have intuitively invented the best way to create vast social networks and keep them growing and evolving without having to stop', Bettencourt says. How well these networks fit together often determines how productive or prosperous a city is, with important implications for the future, he says. 'Over the next few decades we will build as much urban infrastructure as has ever been built during our entire human history', he says. 'It is crucial that this is done in a way that can promote sustainable human development. This work provides a way to calculate the general conditions necessary for a well-functioning city' »[2554].

Le type de prédictions que West et Bettencourt avancent relèvent de tendances générales dans le développement d'une ville, car les centres urbains appartiennent à une classe d'objets qui possèdent un certain nombre de caractéristiques universelles propres : « it is important to emphasize that the average properties of most socioeconomic quantities such as wealth creation, crime and innovation are strongly predicted by the scaling laws »[2555]. La vision physicalo-nomothétique des villes constitue une justification onto-épistémologique de leur travail de conseil : si leurs outils mathématiques reproduisent la structure des systèmes réels, on peut se rendre auprès des décideurs avec une technique d'anticipation et de décision fiable.
En venant en France, lorsqu'on demande à Pumain si les modélisations SimPop ont vocation à prévoir, elle dit en souriant qu'elle aimerait bien, mais que les modèles ne sont pas encore au point :

> « Pour le moment on a fait que de la rétroduction […] pour essayer de reproduire les trajectoires des villes qui ont été observées. On part de la situation initiale et avec ce processus fictif on essaye d'aboutir à la situation finale et quand on y arrive à peu près on est contents. Voilà ce qu'on sait faire pour le moment »[2556].

Toutefois, elle relate que son groupe réfléchit (et vise) à une application prédictive sur le long terme : « si on continue à faire tourner les modèles dans le futur, en imaginant un futur pas trop lointain et des règles qui ne changent pas trop, alors on pourrait utiliser ces modèles pour la prévision. C'est l'ambition qu'on a »[2557]. Elle encourage son ex-doctorante Cottineau à se lancer dans la prédiction, mais elle reste prudente, en exigeant des modèles avec plus de paramètres et qui ont été testés sur plusieurs cas

[2553] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.
[2554] SFI, *Santa Fe Institute 2013 Annual Report*, 2013, p. 3.
[2555] Bettencourt, L.M.A. et al., « Urban Scaling and Its Deviations », *op. cit.*, p. 7.
[2556] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2557] *Ibid.*

d'étude[2558]. Pour l'instant, à Géographie-Cités le mot « scénario » est employé plus souvent qu'au SFI, notamment dans certains travaux de *backcasting*, mais il n'a jamais été employé dans aucune occasion de *travail transépistémique*. Pumain ne nie pas que l'usage du mot scénario dans une collaboration extra-académique puisse arriver avec le temps, particulièrement « quand on aura plus de confiance dans les modèles »[2559]. L'informaticien Mathieu Leclaire corrobore ce point, en ajoutant que ce qui satisfait le groupe, pour l'instant, c'est d'arriver à expliquer : « [à Géographie-Cités] ils n'ont pas la prétention de prédire. Expliquer, c'est déjà une arme pour un modèle. Qu'ils arrivent à prédire, ça arrive assez rarement […] je pense qu'il faut que tu arrives à un niveau de confiance en ton modèle qui est suffisamment haut »[2560]. Prudence mise à part, ce que ces géographes quantitativistes sont en train de dire, c'est que leurs modèles peuvent prédire, même s'ils ne le font pas encore.
En effet, pour Pumain, une des fonctions de la science, y compris de la géographie qu'elle pratique, consiste dans le fait de savoir « envisager raisonnablement ce qui va se passer » dans une situation donnée[2561]. Avec une argumentation semblable à celle de West et Bettencourt, Pumain défend l'idée selon laquelle il existe des inerties en quelque sorte naturelles, qui permettent d'ouvrir certains futurs et d'en fermer d'autres :

> « Il y a des prévisibilités qui peuvent se faire avec une certaine marge d'erreur, par exemple je sais que du jour au lendemain on n'aura pas Paris qui passe des 12 millions à 30 millions d'habitants, qu'il va pas non plus régresser à 5000 habitants, même s'il y a une énorme catastrophe. Ça reste prévisible pour des phénomènes géographiques qui ont une évolution lente pour lesquels on peut faire des projections raisonnables dans le temps »[2562].

En réalité, comme on l'a vu, les informaticiens de l'ISC-PIF se sont déjà lancés dans l'entreprise, au double sens d'initiative et de compagnie. Ils se proposent d'appliquer OpenMOLE aux modèles d'un bureau d'étude qui doit anticiper les effets d'une décision infrastructurelle, géographique ou autre, relative à la vie d'une firme quelconque. Il est vrai qu'OpenMOLE n'est pas un MBA géographique, mais plutôt un méta-modèle, un testeur poppérien de modèles produits par des usagers ; toutefois la confiance des informaticiens de l'ISC-PIF dans leur plateforme provient de l'emploi qu'ils en ont fait en géographie avec les doctorants de Pumain.
Pour Batty, il existe cinq moteurs de changement dans l'évolution des villes : l'aléatoire, la contingence historique, le déterminisme physique, l'avantage naturel et

[2558] Entretien avec Clémentine Cottineau, 12.04.17.
[2559] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2560] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
[2561] Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
[2562] *Ibid.*

l'avantage comparatif[2563]. Si les deux premiers sont la cause d'une certaine imprédictibilité, les trois autres permettent d'avoir des prises sur la modélisation des villes et sur la prédiction de leur évolution future. Le déterminisme physique se réfère aux caractéristiques matérielles et géométriques des espaces où se développent les villes et qui en limitent ou favorisent l'expansion. Les avantages naturels se réfèrent à la disponibilité de ressources dans un territoire donné, tandis que les avantages comparatifs font référence aux rapports entre les villes, donc à la concurrence économique à un moment historique donné, qui détermine l'exploit ou l'effondrement d'un centre urbain.

Régime de l'énonciation des futurs

Cette *communauté d'anticipation*, comme les deux autres, articule de manière originale trois *régimes du futur* au sens de Chateauraynaud : l'anticipation, la prévision et la prospective. À la lumière de ce qui précède, on peut dire que dans la *communauté de l'innovation libérale*

- la modalisation du temps est à cheval entre celle de la prévision, parce qu'il s'agit d'un temps linéarisé et calculé, et celle de la prospective, car ce temps reste ouvert sur une pluralité de possibilités différentes ;
- la logique d'action est à la fois celle de l'anticipation, qui agit (ou souhaite agir) sur l'amont d'un processus en cours en se basant sur des précédents, et celle de la prévision, qui implique un espace de calcul pour la mise en place d'une planification ;
- le prototype est le travail de conseil auprès de décideurs, ONG et entreprises en ce qui concerne l'anticipation des conséquences d'une décision qui doit être prise pour changer le cours présent.

Rapport au futur

Cette communauté propose des scénarios calculés. L'illustre bien un extrait d'entretien avec Beck :

> « *Question :* La problématique de votre MBA sur la ville de Grenoble c'est quoi ?
> *Beck :* Quel est l'impact d'un aménagement, d'une politique publique, qui est celle de la mise en place de la ZAPA, sur la mobilité des individus et sur le trafic et la pollution de l'air. Ensuite tes hypothèses vont être, si on met une ZAPA, les pauvres – je fais vite – sont plus impactés que les riches[2564]. Et on observe un déplacement de la pollution. Et ça on va essayer de le démontrer avec le modèle »[2565].

[2563] Batty, M., *The New Science of Cities*, *op. cit.*, p. 21.
[2564] « Parce que je sais par exemple que les personnes qui ont des revenus plus faibles ont moins d'opportunités, soit de racheter un véhicule écologiquement correct et qui puisse traverser la ZAPA, soit de faire plus de kilomètres et donc dépenser plus d'essence » : entretien avec Elise Beck, 17.09.15.
[2565] *Ibid.*

Si, dans ce groupe social, le rôle de la science est d'indiquer les chemins pour atteindre un objectif préfixé, en anticipant les conséquences de certains choix, le rapport au temps implique une flèche qui va du présent vers l'avenir. Le but est d'infléchir cette flèche, en construisant quelque chose d'inédit. On verra que dans le cas de l'épidémiologie, le rapport est tout à fait inverse : là il s'agit d'infléchir la flèche qui vient du futur vers nous. En géographie il s'agit toujours d'intervenir sur une inertie qui procède régulière depuis le passé, à travers le présent et vers le futur. En épidémiologie, l'enjeu est d'intervenir sur un malheur qui se dirige vers nous de manière inévitable, mais qu'on peut limiter, voire empêcher, si l'on s'y prend à temps.
Une autre distinction importante est à signaler. Tant dans le cas des français qui emploient des MBA qu'*a fortiori* dans le cas des physiciens du SFI qui emploient des équations mathématiques, les anticipations ne peuvent pas atteindre le degré de finesse de celles des épidémiologistes computationnels. Toutefois, ce constat ne produit pas la même réaction chez tous les chercheurs et toutes les chercheuses. Pumain et West utilisent cet argument de l'aspect « *coarse grained* »[2566] de leurs techniques pour soutenir que leurs anticipations ne peuvent qu'être sur des temps longs, pour montrer des tendances générales. West dit 5-20 ans, Pumain s'étend au-delà pour arriver à plusieurs dizaines d'années. Mais il y a aussi l'opinion contraire, lorsque l'ex-doctorant de Pumain, Antonio Ignazzi, suggère que, en raison de l'« inscrutabilité de l'histoire » (due au libre arbitre des êtres humains), il n'a justement pas de sens de prolonger les prévisions des modèles au-delà d'un seuil de cinq ans[2567].

Vision des systèmes complexes

Si, pour nommer les trois communautés, nous avions donné plus de poids à l'aspect des visions des systèmes complexes, nous aurions pu nommer celle-ci la *communauté des systèmes complexes plats*. Dans une vision libérale, la verticalité d'une seule entité (tel l'État, mais pas seulement) est déniée. Même si aucun de nos interviewés se réfère à Hayek en y cherchant une caution intellectuelle ou une inspiration (tandis que d'autres représentants des SSC, notamment en économie, le font explicitement), cette communauté présente la vision des systèmes complexes qui, parmi les trois, s'approche le plus de la vision auto-organisée, autorégulée, plate et concurrentielle du courant (néo)libéral. C'est ce que montre ce passage tiré d'un article de Pumain, qui donne raison aux auteurs qui voient dans la digitalisation du monde un allié idéal d'un capitalisme de plus en plus globalisé :

> « La principale caractéristique dynamique des systèmes de peuplement urbains semble être la concurrence entre leurs éléments, pour la captation et la création de

[2566] Entretien avec Geoffrey West, 19.07.18.
[2567] Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.

> richesses, par l'échange, l'innovation (anticipation) et l'adoption (imitation) des innovations. Cette forme d'évolution est permise par la très forte connexité du système, qui assure la circulation de l'information »[2568].

L'innovation devient le moteur principal de l'histoire, lorsqu'on présuppose un contexte social libéralisé, où la décision politique est vue surtout comme une régulatrice de flux.
Ces systèmes complexes restent tout de même prédictibles, car il existe une série de régularités les concernant, de sorte que l'espace des possibles n'est pas infini. Cela d'autant plus que l'évolution des villes peut être surveillée par le biais d'un nombre restreint de paramètres (démographie, PIB, taux d'innovation, etc.), qui les rendent semblables à des nœuds entre lesquels des flux circulent. Et les flux peuvent se déplacer, mais ne disparaissent pas. Le système mondial des villes devient un grand réseau interconnecté qui respire, en se régulant sur la base de transferts et d'équilibres entre vases communicants. En caricaturant un peu, l'un des discours que les individus s'inscrivant dans cette communauté tiennent typiquement est le suivant : puisqu'on sait que lorsqu'une ville attire des capitaux et qu'elle investit en innovation elle finit par avoir plus de richesse, plus d'infrastructures et plus d'habitants, on peut anticiper que si l'on veut qu'une ville croisse il faut augmenter les flux de capitaux et d'investissements.

Communauté de la coconstruction autogestionnaire

Dans ce groupe l'on observe une certaine variété dans les parcours académiques des scientifiques, mais ceux-ci sont proches en ce qui concerne les autres aspects de la *communauté d'anticipation*. Nous y trouvons Arnaud Banos, ainsi qu'un ensemble d'autres géographes, informaticiens, écologues et sociologues qui s'inscrivent dans un mouvement de recherche-action qui s'appelle ComMod, contraction de *companion modeling* ou modélisation d'accompagnement. Même si, dans notre corpus d'interviewés, nous n'ayons qu'un individu qui s'inscrit dans ce régime, le groupe de ComMod est suffisamment volumineux, structuré et solide pour qu'on puisse inclure sa typologie dans notre tableau, à partir des témoignages de Banos et des textes fondamentaux du collectif auquel il s'inspire.

Disciplines et techniques mobilisées

ComMod est à la fois une méthode de recherche et un mouvement de recherche-action[2569]. Fondé par un groupe de chercheurs et de chercheuses du Centre International pour la Recherche Agronomique et le Développement (CIRAD[2570]) en

[2568] Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*, p. 129.
[2569] Collectif ComMod, « La modélisation comme outil d'accompagnement », *Natures Sciences Sociétés*, 2005, n. 13, pp. 165-168.
[2570] Le site officiel du CIRAD : http://www.cirad.fr.

2003 sous forme d'association, ce collectif est un dispositif qui mêle des objectifs de recherche, des protocoles, des techniques et des objectifs politiques afin de pacifier des situations conflictuelles. Ses représentants définissent ComMod comme « une démarche d'appui à la gestion des ressources renouvelables »[2571]. Les « parties prenantes » des projets peuvent être des socioprofessionnels, des associations, des techniciens, des experts, des administrateurs locaux et des scientifiques issus de plusieurs disciplines naturelles et humaines. ComMod met souvent en place des laboratoires « en plein air »[2572] dans des zones-frontières, en proposant une variété d'outils : des diagnostics informels et verbaux, des représentations scientifiques et formelles, des cartes, des jeux sérieux, des audits, de l'expertise légale, ainsi que des modèles numériques comme les MBA.

L'association ComMod réunit plus de quarante membres provenant principalement de France mais aussi depuis plusieurs pays des Sud[2573]. On y retrouve des modélisateurs, des écologues, des géographes et des sociologues. En suivant la charte constitutive de ce mouvement de recherche, ainsi que l'un de ses articles fondateurs[2574], l'approche ComMod est définie comme une forme de géoprospective[2575] participative, qui mire à produire de la connaissance scientifique autour des « systèmes socio-écologiques complexes » et à fournir une gestion efficace, démocratique et soutenable de la planification urbaine et des ressources naturelles. Depuis le début de son histoire, ComMod a été appliqué dans plus de soixante cas d'étude dans plusieurs pays (Laos, Cambodge, Sénégal, Brésil, etc.) pour résoudre différents types de problématiques : gestion de l'eau, des frontières nationales, des forêts et des parcs naturels, de la pêche, et ainsi de suite[2576].

En fonction des connaissances mobilisées et de la vision que ComMod a des humains, cette *communauté* peut être nommée également *socioécologico-agentiviste*. Les objets d'étude sont des conglomérats hybrides de sociétés humaines, écosystèmes et techniques. Les êtres humains y sont vus comme des agents qui maîtrisent leur destin. La référence à l'*agency* distingue cette communauté de la précédente, où les composants du système sont vus comme dépossédés de la connaissance de l'ensemble et à la fois de la possibilité d'agir sur cet ensemble.

[2571] Étienne, M. (ed.), *La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*, Versailles, Éditions Quæ, 2010.

[2572] Callon, M., Lascoumes, P. & Barthe, Y., *Agir dans un monde incertain*, Paris, Seuil, 2001.

[2573] https://www.commod.org/qui-sommes-nous/adherents.

[2574] Étienne, M., « La modélisation d'accompagnement : une forme particulière de géoprospective », *L'Espace géographique*, 2012, tome 41, n. 2, pp. 128-137.

[2575] La géoprospective est une spécialité fondée récemment au sein de la géographie. Son objectif est d'anticiper, grâce aux outils de scénarisation et de simulation, le développement territorial soutenable d'une communauté, impliquant différentes parties prenantes (décideurs politiques, citoyens et citoyennes, associations, entreprises) dans le processus de prise de decision : Emsellem, K., Liziard, S., & Scarella, F., « La géoprospective : l'émergence d'un nouveau champ de recherche ? », *L'Espace géographique*, 2012, n. 2, vol. 41, pp. 154-168.

[2576] https://www.commod.org/etudes-de-cas.

Si les épidémiologistes computationnels ont du mal à se faire accepter par les épidémiologistes de profession, d'autre part Banos considère que c'est aux modélisateurs – des villes ou des épidémies – de faire « un pas vers […] les décideurs, vers les politiques, vers les techniciens, vers les élus »[2577]. Cela à travers un travail de pédagogie proactif qui vise à mener à une partielle ou totale autonomie des autres « parties prenantes » par rapport aux techno-savoirs produits : les *stakeholders*, selon Banos, ne doivent pas être abandonnés avec un outil computationnel dans les mains qu'ils ne savent pas traiter ; ils doivent plutôt être accompagnés « vers l'appropriation de l'outil »[2578]. Celle-ci est la philosophie de la « modélisation d'accompagnement », que Banos s'est proposé de suivre dans ses travaux les plus récents.

Le directeur de Géographie-Cités ne fait pas partie des membres fondateurs du collectif ComMod, mais il en a partagé les tenants dans un projet qui a été financé par le Forum Vie Mobiles, émanation de la SNCF. Le projet s'appelle Post-car Île-de-France[2579] et s'est composé d'une équipe multidisciplinaire, qui incluait des urbanistes, des géographes et des modélisateurs. Le but du projet était d'explorer l'évolution future du système de transports dans la région Île-de-France. À un moment où des associations pour la qualité de l'air (AirParif, Respire, Poumons) demandent une ville sans voitures et où les lobbies automobiles et les conducteurs s'opposent à un tel scénario[2580], la prémisse du projet dirigé par Banos était celle de reconnaître que la voiture « est au cœur d'un système d'externalités négatives bien renseigné qui affecte la santé publique via la pollution locale et l'accidentologie, qui nuit à l'environnement local et mondial via sa participation au changement climatique, et qui consomme une part importante de l'espace urbain »[2581]. Du fait du trafic et de la pollution qui le caractérisent, le Grand Paris a paru être, aux yeux des organisateurs du projet, un terrain idéal pour enquêter sur des scénarios sans voiture. Banos tient à spécifier qu'« il [ne] s'agi[ssai]t pas de faire de la science-fiction, […] on n'[était] pas là pour inventer les technologies du futur »[2582]. Le but du projet était plutôt de poser la question suivante : « si on enlevait la voiture, comment est-ce que ça pourrait fonctionner différemment ou ne plus fonctionner ? »[2583]. Une enquête préalable a été menée par des étudiants en Master de géographie afin d'investiguer les aspirations des citoyens et des citoyennes à l'égard de la mobilité future de Paris, en relation à leur poste de travail et au coût du transport. Les MBA et les jeux sérieux ont été utilisés

[2577] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2578] *Ibid.*
[2579] http://fr.forumviesmobiles.org/projet/2017/02/27/post-car-ile-france-3516.
[2580] Rumpala, Y., « De l'objectivation des risques à la régulation des comportements. L'information sur la qualité de l'air comme instrument d'action publique », *Réseaux*, 2004, vol. 4, n. 126, pp. 177-212 ; Chateauraynaud, F. & Debaz, J., « Des alertes à couper le souffle. Point sociologique sur les particules fines et la pollution atmosphérique », *Socioinformatique et Argumentation*, 15 octobre 2012 : http://socioargu.hypotheses.org/4129.
[2581] http://fr.forumviesmobiles.org/projet/2017/02/27/post-car-ile-france-3516.
[2582] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2583] *Ibid.*

comme des instruments de participation citoyenne : des ateliers participatifs ont été organisés à plusieurs reprises, dans différentes parties du Grand Paris. Les résultats des simulations étaient disponibles en accès libre et modifiables par les usagers.

Imaginaire sociotechnique

Par ses concepteurs et ses associés, ComMod est défini comme une solution à des situations conflictuelles[2584]. Dans un article de 2010, deux représentants de l'association, Alexey Voinov et François Bousquet, font une affirmation d'emblée politique, lorsqu'ils regrettent les situations dans lesquelles l'apport des « parties prenantes » est resté purement formel : « in far too many cases stakeholders have merely been paid lip service and their engagement has consequentially been quite nominal »[2585]. Par conséquent, les auteurs écrivent souhaiter pourvoir des manières d'implémenter des décisions avec « moins de conflits » et plus d'efficacité, grâce au fait que le dispositif ComMod implique les « parties prenantes » depuis la construction du modèle jusqu'à la production de ses résultats. En suivant l'approche post-normale de Jerome Funtowicz et Silvio Ravetz[2586], les « commodiens » (comme ils s'auto-désignent(visent à garantir la qualité du processus de décision et non pas la qualité de la décision en elle-même : « La qualité des décisions dépend de la qualité du processus de décision lui-même, entre autres de l'existence d'un dialogue préalable entre les acteurs concernés, non seulement pour vérifier que ces décisions sont acceptables mais aussi pour les coconstruire »[2587]. La logique de l'accompagnement à la décision marque, d'après Banos, un déplacement par rapport à l'aide à la décision. Cette dernière implique, pour lui, une infantilisation des « parties prenantes » ; celles-ci devraient plutôt trouver d'elles-mêmes la solution à leur problème :

> « Historiquement on a parlé beaucoup d'aide à la décision dans le sens où on va aider les gens à prendre une décision, comme tu aides un enfant à attraper un pot de confiture, tu amènes une chaise et tu lui dis d'attraper le pot. […] tu peux te demander ce que l'enfant a vraiment appris du dispositif. Dans l'aide à la décision il n'y a pas de transfert de compétences, alors que l'accompagnement à la décision c'est l'idée qu'il faut accompagner : dans le cas du pot de confiture il s'agirait de voir avec l'enfant comment il pourrait faire pour attraper le pot de confiture,

[2584] « [Dans ComMod] il y a cette idée de créer un modèle qui permette de représenter une réalité autour de laquelle on puisse mettre des acteurs qui éventuellement ne se comprennent pas, ne parle pas la même langue, éventuellement passe leur temps c'est un peu déçu, par exemple si c'est la gestion de l'an en Thaïlande ou au Burkina ou la gestion des prairies, là tu vas voir des gens qui s'entretuent sur le terrain, soit parce que la ressource est rare soit parce qu'ils utilisent la ressource de manière complètement différente entre les pasteurs, les nomades etc. » : *ibid.*

[2585] Voinov, A. & Bousquet, F., « Modelling with Stakeholders », *Environmental Modelling & Software*, 2010, vol. 25, n. 11, pp. 1268-1281.

[2586] Funtowicz, S.O. & Ravetz, J.R., « Science for the post-normal age », *Futures*, vol. 25, n. 7, pp. 739-755.

[2587] Étienne, M. (ed.), *La modélisation d'accompagnement*, *op. cit.*, p. 10.

l'amener à identifier ensemble dans l'environnement ce qui peut lui permettre d'atteindre l'objectif »[2588].

L'idée de ComMod « n'est pas de faire des modèles et d'apprendre aux gens à se servir des modèles », l'idée est plutôt de « construire les modèles avec les décideurs »[2589]. Intégrer les « intuitions […] assez avancées » des participants leur donne plus de confiance dans la façon d'« exploiter l'auto-organisation plutôt qu'en avoir peur »[2590]. Cela passe par une mise en situation qui est modélisée par différents dispositifs – souvent des MBA qui montrent visuellement aux participants les mécanismes qui relient les actions des différentes « parties prenantes » entre elles[2591]. Une telle vision d'ensemble, selon Banos, permettrait aux différentes catégories de participants de prendre mieux conscience des effets de leurs actions sur les autres, ainsi que d'envisager des meilleures stratégies, éventuellement coopératives, pour atteindre les objectifs individuels ou communs :

« l'idée c'est que dans ce modèle participatif tu identifies des rôles, tu affectes ces rôles à des citoyens, des techniciens, des élus, ils jouent ces rôles dans le modèle […] très souvent quand on joue un rôle professionnel on a une vision très segmentée du problème. [ComMod permet de montrer] […] les attentes des différents corps de métiers, la nécessité de s'informer mutuellement, de définir ensemble les objectifs, d'expliciter ses objectifs, de comprendre les objectifs des autres, de définir des objectifs communs, d'aller vers la coopération, sachant que la coopération n'est pas du tout quelque chose de naturelle »[2592].

Le cadre de cette recherche-action se marie avec une philosophie refusant de voir les scientifiques comme les « gendarmes du monde », qui doivent se rendre dans les lieux problématiques de la planète, pour fournir clés-en-main une solution aux problèmes[2593]. Pour éviter l'infantilisation des participants, le collectif ComMod, ainsi que Banos, voient l'accompagnement comme un processus à même d'assurer l'*empowerment* des « parties prenantes », en leur attribuant une rationalité propre ; pour le coup, cette association s'engage explicitement à conférer à la science un rôle dans la gestion des biens communs, surtout en faveur des plus faibles ou des marginaux :

« il s'agit pas simplement d'identifier ou de faire le gendarme du monde, identifier les problèmes, y arriver et puis de chercher à les résoudre […] puisque tous ces

[2588] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2589] *Ibid.*
[2590] *Ibid.*
[2591] *Ibid.*
[2592] *Ibid.*
[2593] *Ibid.*

> acteurs-là sont rationnels, ils n'adhéreront pas à la solution puisque c'est la meilleure. Ça marche pas comme ça. […] Tout ça […] s'ancre dans ce qu'on appelle *empowerment*, avec cette idée de contribuer par la science à redonner aux citoyens, surtout à ceux qui sont le moins en situation d'avoir prise sur leur présent, leur futur, de leur donner les moyens de devenir acteurs dans ce processus »[2594].

Les commodiens mettent l'accent sur la réflexivité des outils mobilisés, souvent simples et « jetables » (à la différence des plateformes du style SimPop, EpiSimS ou GLEaM) :

> « L'utilisation des modèles est réflexive : les acteurs apprennent collectivement en créant, modifiant ou observant les modèles. Ces outils permettent aux acteurs d'émettre des hypothèses, de proposer des scénarios et d'en observer collectivement les conséquences. On dit parfois de ces modèles que ce sont des modèles 'jetables', c'est-à-dire une représentation partagée entre un groupe d'acteurs, à un moment donné. Ils sont souvent une représentation extrêmement simplifiée de la question posée mais néanmoins suffisante pour refléter la complexité du système en prenant en compte les principales dynamiques et interactions »[2595].

Dans ComMod la relation avec les décideurs politiques change radicalement, non seulement par rapport au conseil pratiqué par West et Bettencourt auprès d'institutions gouvernementales ou d'ONG, mais aussi vis-à-vis du rapport en fil direct, d'expert à décideur, que l'on retrouve chez les épidémiologistes computationnels. Le dispositif ComMod est, autrement dit, explicitement chargé de la mission de faire en sorte que toutes les « parties prenantes » soient mises à pied d'égalité. C'est pour cela que les commodiens posent un cadre pour déterminer la « posture du chercheur », lequel 1) doit rendre transparentes ses hypothèses et ses procédures, 2) ne doit pas imposer ses connaissances mais les partager et 3) doit enfin permettre la remise en discussion de tout aspect du processus de la part de quiconque[2596]. L'objectif de la modélisation d'accompagnement, c'est de se faire un dispositif symétrisant :

> « Je pense qu'il y a une question de choix, dans mon cas et dans le cas des gens avec qui je travaille. Dans le cas de ma communauté c'est un véritable choix parce qu'on considère que le monde n'appartient pas aux décideurs. Le monde appartient à l'humanité et que c'est l'humanité qu'il faut faire avancer et pas les décideurs »[2597].

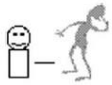
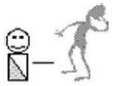
[2594] *Ibid.*
[2595] Étienne, M. (ed.), *La modélisation d'accompagnement*, *op. cit.*, p. 13.
[2596] I*bid.*, p. 14.
[2597] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.

Pour maximiser la prise en compte du plus grand nombre de participants, les commodiens ont trouvé un expédient technique, résidant dans le couplage entre l'emploi de la figure d'un animateur peu invasif[2598] et le choix d'« une 'grammaire' prédéfinie, en général peu discutée car peu formalisée et assez intuitive »[2599]. Le cadre est donc celui d'un espace de débat habermassien simplifié, décomposé en plusieurs parties ouvertes à la contestation et agi par plusieurs langages différents, le plus possible accessibles.
Le nom de cette *communauté d'anticipation*, qui fait référence à la *coconstruction* et à l'*autogestion*, devrait maintenant être clair. Si on analyse la typologie des modèles qui sont utilisés par les commodiens, l'intention d'inscrire le côté participatif dans les outils devient frappante. Les modélisateurs ne parlent pas de MBA, mais de « modèle de simulation à base d'agents hybrides » ou MAHy, et cela pour parvenir à un « jeu de rôle informatisé »[2600]. Les MAHy ont au moins cinq fonctions :

> « 1) saisie des décisions des agents humains ; 2) calcul d'indicateurs liés aux performances (actions) des agents ; 3) simulation de la dynamique de la ressource ; 4) visualisation de l'espace (état des ressources, positionnement des agents, éventuels points de vue sur cet espace spécifiques à chaque type d'agent) ; 5) spécification avec un langage informatique des décisions (comportements) d'agents »[2601].

La première fonction est dédiée aux participants aux ateliers ComMod, pour leur permettre d'insérer leurs décisions dans la simulation numérique. La fig. 28 montre et commente les quatre typologies d'agents qui peuvent composer et animer un MAHy dans le cadre de ComMod. À part la décision purement humaine, il y a celle humaine relayée par un agent informatique, puis celle partiellement humaine et automatisée, et enfin celle complètement automatisée, lorsque par exemple l'agent représente un non-humain, tel qu'un animal ou un arbre.

[2598] « Bien que les outils (tableaux informatiques, tableau noir, papier post-it) permettent à tous les participants de modifier directement le modèle, c'est souvent le modélisateur qui 'tient le crayon' et anime la discussion pour tenter d'intégrer les concepts et les mettre en synergie » : Étienne, M. (ed.), *La modélisation d'accompagnement*, *op. cit.*, p. 86.
[2599] *Ibid.*, p. 87.
[2600] *Ibid.*, p. 76.
[2601] *Ibid.*, pp. 75-76.

Nature de la décision	Humaine à 100 %		Intermédiaire	Informatique à 100 %
Typologie des agents modélisés	Agent humain : joueur	Agent composite simple	Agent composite hybride	Agent informatique : agent virtuel
				
	Pas d'avatar	Avatar non décisionnel	Avatar partiellement décisionnel	Avatar autonome

Lorsque toutes les décisions d'un agent sont prises par un être humain et qu'il n'y a pas de relais informatique, l'agent est de type agent humain (communément appelé joueur). Lorsque cette même décision est relayée par un avatar (représentant informatique d'un agent humain) sans aucune autonomie décisionnelle, on parlera d'agent composite simple. À l'opposé, lorsque la décision est intégralement prise en charge par l'avatar autonome (tous les processus de décision sont automatiquement réalisés par l'exécution d'instructions informatiques), on utilisera le terme d'agent informatique (ou virtuel). Le cas intermédiaire d'un agent humain relayé par un avatar partiellement décisionnel sera dénommé « agent composite hybride ».

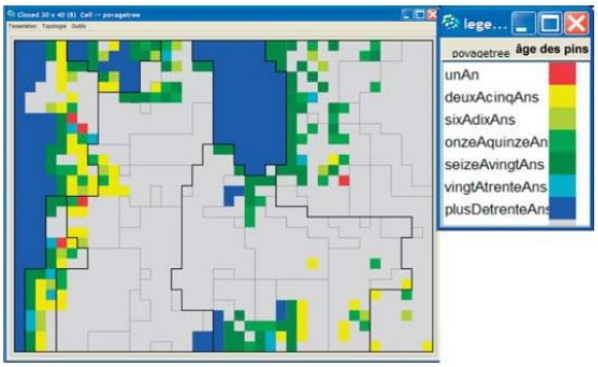
Figure 28. Fonctionnement du MAHy dans le cadre de ComMod. Image tirée de Étienne, M. (ed.), La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*, Versailles, Éditions Quæ, 2010, p. 75*

L'avatar des « parties prenantes » n'est pas la seule chose manœuvrable par les participants : les commodiens leur permettent d'intervenir aussi sur les règles du jeu modélisé, c'est-à-dire l'organisation des interactions entre les agents représentés dans le MAHy :

> « Dans le cadre de la modélisation d'accompagnement, scénario s'entend plutôt comme un mode de fonctionnement du modèle de simulation, ou plus exactement un ensemble de facteurs qui va modifier son fonctionnement : tel acteur modifie son comportement, telle dynamique écologique est perturbée, telle variable sociale ou économique est changée. Il est aussi fréquent que l'on envisage une modification de l'organisation des interactions (nouveaux systèmes d'échange, nouveaux protocoles de négociation) »[2602].

La visualisation du MBA est maintenue simple et explicite. Comme on peut le voir dans les fig. 29 et 30, issues de deux projets ComMod sur des problématiques de sylviculture, l'espace du territoire est divisé en celles, qui prennent des couleurs nettes et vives selon la fonction qui les caractérise : le temps pris par la dissémination des pins dans la fig. 29 ou alors le type de coupe de bois, le type de gestion de la sylviculture et le type de biodiversité présente dans la fig. 30.

[2602] *Ibid.*, p. 95.



Méjan jeu Dans MejanJeu, le jeu démarre au moment où le processus de dissémination des pins est suffisamment avancé pour que les joueurs subissent rapidement les effets de l'enrésinement spontané sur les prairies naturelles.
Pour accélérer encore le processus, les décisions prises par les joueurs sont répétées à l'identique pendant 3 ans, ce qui permet qu'une session de jeu organisée sur 5 tours fasse expérimenter l'apparition d'une nouvelle génération de pins (maturité à 15 ans).

Figure 29. Dans ce MBA développé dans le cadre de ComMod sur une problématique de sylviculture, l'espace du territoire est divisé en celles, qui prennent des couleurs nettes et vives selon la fonction qui les caracterise : ici le temps pris par la dissémination des pins. Image tirée de Daré, W., Ducrot, R., Botta, A. & Étienne, M., « Repères méthodologiques pour la mise en oeuvre d'une démarche de modélisation d'accompagnement », Power Point ComMod, février 2009, p. 79

Méjan Sur le Causse Méjan, huit scénarios ont été élaborés et discutés collectivement. Chacun a été visionné selon les points de vue souhaités par les participants. Certains permettent de localiser les interventions programmées (coupes), d'autres de suivre l'évolution d'enjeux complexes (biodiversité), d'autres enfin de visualiser la dynamique d'une entité de gestion (parquets de sylviculture).

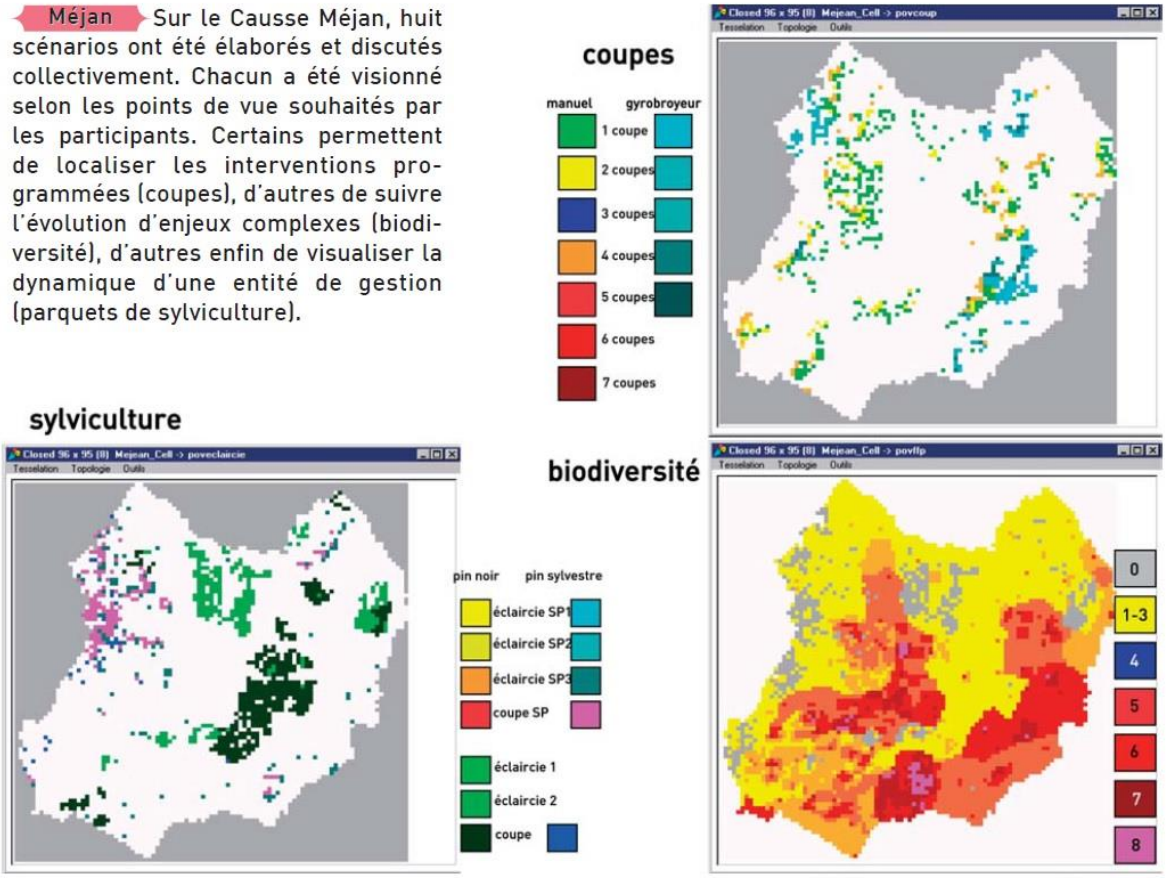


Figure 30. Dans ce MBA développé dans le cadre de ComMod sur une problématique de sylviculture, l'espace du territoire est divisé en celles, qui prennent des couleurs nettes et vives selon la fonction qui les caracterise : ici le type de coupe de bois, le type de gestion de la sylviculture et le type de biodiversité. Image tirée de Daré, W., Ducrot, R., Botta, A. & Étienne, M., « Repères méthodologiques pour la mise en oeuvre d'une démarche de modélisation d'accompagnement », Power Point ComMod, février 2009, p. 88

Dans une optique de soutenabilité environnementale et de justice sociale, l'ambition de ComMod est d'atteindre la symétrie dans le processus de prise de décision, par le biais de la « neutralité » politique et épistémique des scientifiques modélisateurs. L'argument du collectif procède ainsi : à la lumière de la pluralité des points de vue en

présence lors d'un conflit, ComMod s'engage à les considérer tous comme également légitimes. Dans ComMod, les modélisateurs collectent l'information des « parties prenantes » afin de mettre au point un ou plusieurs modèles (numériques ou pas) et de « coconstruire » avec tous les participants une série de scénarios possibles. Dans un tel processus, le modélisateur est vu comme un « médiateur » entre plusieurs cultures, savoirs et intérêts souvent divergents, tandis que la simulation est en charge de faire de médiatrice entre différentes échelles, pour montrer l'impact des échelles globales sur celles locales et vice versa. Ceux qui décident sont et doivent être les *stakeholders* tous ensemble, après avoir vu et compris les relations qui les lient et les conséquences de leurs actions. Une expérience ComMod réussie est celle où tous les points de vue ont été représentés et où les dysfonctions du système socio-écologique ont été repérées et résolues par une discussion et une prise de décision collectives.

Onto-épistémologie

Des trois manières d'entendre le rapport entre géographie et culture décrites par Varenne, possibiliste est celle qui correspond à la démarche de ComMod. Mais si chez les géographes de la *communauté d'anticipation* décrite précédemment les contraintes valaient plus que la liberté de mouvement des humains, ici c'est plutôt l'inverse.
En outre, l'*onto-épistémologie* de ce groupe social est celle des *dualistes*. La simulation n'est pas là pour prouver, mais pour constituer un jeu qui montre des liaisons de cause à effet capables de faire changer le comportement aux joueurs dans la vie réelle.

Performativité de la simulation

Les MBA employés dans ComMod ont une visée éminemment pédagogique. Leur fonction est moins heuristique que révélatrice. Les participants sont mis autour d'une table pour qu'ils prennent conscience d'un état de faits, souvent indésirable, pour qu'ils puissent vouloir le changer et savoir comment le changer. Les simulations (numériques ou autres) reproduisent et donnent à voir les interrelations qui lient les « parties prenantes » entre elles à l'état présent :

> « les systèmes écologiques et sociaux que nous étudions sont des objets complexes, et en conséquence, l'accompagnement du processus de décision ne consiste pas à tenter de prédire l'état futur du système. Il s'agit plutôt de comprendre l'organisation dans laquelle il se trouve, d'envisager les organisations désirées, de favoriser le système d'interactions qui préside au changement, de le suivre en continu et de rendre explicite l'évolution du système afin de pouvoir proposer des adaptations et d'apprendre continuellement en observant les effets de ces adaptations »[2603].

[2603] *Ibid.*, p. 10.

Les organisateurs de la modélisation d'accompagnement espèrent résoudre le problème d'une communauté par une triade d'actions : 1) induire les participants à la prise de conscience de leurs interdépendances, 2) mettre en lumière les dégâts que les participants se font les uns les autres à l'état présent et 3) préfigurer les bénéfices qu'un changement des comportements individuels pourrait apporter pour le bien collectif. En somme, les outils de ComMod exercent donc une fonction miroir sur une microsociété censée prendre conscience d'elle-même pour mieux s'autogérer.

Régime de l'énonciation des futurs

Cette *communauté d'anticipation*, comme les deux autres, articule de manière originale trois *régimes du futur* au sens de Chateauraynaud : l'anticipation, la prévision et la prospective. À la lumière de ce que nous avons vu, on peut dire que, sans trop de différences par rapport au groupe précédent, dans la *communauté de la coconstruction autogestionnaire*

- la modalisation du temps, fortement ancrée sur le présent, est à cheval entre celle de la prévision, parce qu'il s'agit d'un temps linéarisé et calculé, et celle de la prospective, car ce temps reste ouvert sur une pluralité de possibilités différentes ;
- la logique d'action est à la fois celle de l'anticipation, qui agit (ou souhaite agir) sur l'amont d'un processus en cours en se basant sur des précédents, et celle de la prévision, qui implique un espace de calcul pour la mise en place d'une planification ;
- le prototype est le travail de « coconstruction » avec plusieurs « parties prenantes » d'une série de scénarios pour changer le cours présent des choses.

Rapport au futur

Comme dans la *communauté de l'innovation libérale*, dans ce groupe on a à faire avec une série d'avenirs possibles, dont le premier est la simple continuation du présent. Les autres scénarios sont évoqués afin de montrer aux participants les dangers de la continuation du présent et pour les informer et motiver à changer un cours des choses inertiel dysfonctionnel. Si les scénarios *what-if* des épidémiologistes servent à trouver la meilleure solution pour éviter le pire des scénarios, les scénarios *what-if* des géographes en général servent à trouver un chemin à parcourir pour construire quelque chose d'inédit. Le rapport au temps de la *communauté de la coconstruction autogestionnaire* implique une flèche qui va du présent vers l'avenir, le but étant d'infléchir cette flèche pour produire une réalité nouvelle.

Vision des systèmes complexes

Autant les modèles de la première communauté inscrivent la compétition capitaliste dans ses formules mathématiques et informatiques, autant les modèles de cette communauté sont inscrits dans un dispositif qui vise à promouvoir la « collaboration » plutôt que la « concurrence »[2604]. Si la précédente était la *communauté des systèmes complexes plats*, celle-ci peut être nommée la *communauté des systèmes complexes symétriques*. Les soutiens de la modélisation d'accompagnement refusent en effet l'idée d'un système complexe auto-organisé qui tendrait naturellement à une auto-organisation positive pour tous ses éléments. Une telle auto-organisation n'est pas exempte, d'après Banos, d'« effets pervers », car elle n'assure pas une effective redistribution des richesses :

> « [Dans ComMod] il y a quand même cette idée que sans collaboration c'est très difficile de piloter un système complexe, parce que c'est ça aussi un point qu'on défend, c'est-à-dire l'idée que dans un système complexe il n'y a aucune neutralité de logique […]. On peut considérer qu'un système complexe n'a que des aspects positifs liés à l'auto-organisation, tout ce qu'on entend sur l'intelligence collective, enfin toutes ces choses merveilleuses qui seraient des propriétés innées des systèmes, nous on n'y croit pas du tout. Je pense qu'il y a beaucoup plus d'effets pervers liés à ces systèmes-la, notamment liées à l'importance de ces boucles de rétroaction positive, d'auto-renforcement qui font que ça génère énormément d'inégalités si on n'introduit pas de la régulation aux bons endroits »[2605].

Dans un modèle alternatif d'épidémiologie computationnelle, dont Banos s'est occupé à plusieurs reprises, il vise à déconstruire la conviction répandue selon laquelle, en tant que citoyens et citoyennes isolés, les individus ne comptent pas grand-chose : « Le citoyen se dit qu'individuellement il ne pèse rien. Nous ce qu'on veut casser c'est ça, cette vision asymétrique qui n'est pas une réalité »[2606]. Puisque les épidémies se diffusent dans des « réseaux complexes », où si l'on barre une route le virus peut toujours trouver des « chemins alternatifs », et puisque certaines solutions jugées « médiévales », comme la fermeture des frontières ou les mises en quarantaine, sont inutiles voire contreproductives, il s'agit pour lui et ses collaborateurs de parvenir à des modèles en ligne sous forme de jeu où les personnes puissent comprendre les conséquences de leurs actions[2607]. Parfois contre-intuitives, ces conséquences sont le résultat de ce que Banos appelle l'« interaction spéculaire » :

[2604] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2605] *Ibid.*
[2606] *Ibid.*
[2607] *Ibid.*

« on peut introduire des politiques de santé publique et de protection, par exemple faire en sorte que toutes les compagnies aériennes imposent le porte du masque dans les avions, ceci est une forme de régulation par le haut et puis on peut commencer à envisager des choses un petit peu alternatives […] au niveau du citoyen de base qui prend l'avion. […] j'ai une épidémie qui est en train de se déclencher, j'avais prévu de partir pour le Brésil, je vois qu'il commence à y avoir une épidémie, est-ce que j'ai vraiment envie d'aller au Brésil ? Là [le citoyen] peut décider d'y aller, il peut décider que finalement il ne va pas y aller, et peut décider par exemple d'aller au Mexique […] [Avec] le fait de décider de ne pas aller à un endroit et d'aller à un autre endroit, le citoyen a l'impression de faire un acte utile et en fait, vu la configuration du réseau et la vitesse de propagation du virus, ça entraîne une accélération et un élargissement de l'emprise de la propagation de l'épidémie. […] parce qu'en gros ça amène les gens à aller à un endroit où ils ne seraient pas allés s'il n'y avait pas eu l'épidémie. Parmi tous ces gens-là il y en a forcément qui sont malades. Ce genre de comportement qui peut paraître positif se révèle être […] un comportement négatif […] Donc le fait de pouvoir le visualiser par la modélisation relève de la prise de conscience de son impact avec toujours ce problème qui est, 'C'est pas moi qui va changer les choses', oui mais sauf qu'on est dans ce qu'on appelle interaction spéculaire, à savoir qu'on n'est pas les seuls à agir en fonction de ce que font les autres »[2608].

La plateforme en ligne décrite par Banos implique une participation qui, du fait de l'aspect pédagogique de l'outil, permet à l'usager de la plateforme de prendre une décision individuelle qui a un impact global, à l'aune d'une politique publique centralisatrice et de grande échelle.

Si dans la première communauté le rôle du scientifique est décrit comme presque neutre, pour ComMod le chercheur peut et doit être engagé. Banos emploie de son propre ressort le terme d'idéologie, en proposant une lecture qui semble faire de contrepoids à la lecture de ses collègues de la communauté précédente : « c'est une question idéologique, puisque savoir si un système doit produire de l'égalité ou de l'inégalité, c'est un choix. Il ne faut pas absolument avoir une approche neutre de ce système-là au prétexte qu'on fait de la science »[2609]. Il en suit une manière d'entendre le dispositif sociotechnique qu'est ComMod d'une manière explicitement engagée politiquement : « l'idée [c'est] d'utiliser la modélisation et le jeu [pour] créer les conditions d'émergence d'une réflexion qui soit suffisamment contextualisée, mais pas bridée ni orientée pour autant »[2610]. Sorte de laboratoire en plein air, ComMod est un dispositif de recherche-action, au sein duquel la science se perçoit et se veut comme d'emblée d'intérêt public, à partir d'un certain nombre de principes politiques, et

[2608] *Ibid.*
[2609] *Ibid.*
[2610] *Ibid.*

comme finalisée à produire des effets sociaux précis. Ce qui nous porte à relativiser, sinon contrecarrer, les lectures sociologiques ou philosophiques qui décrivent les théories de la complexité, ou les SSC en particulier, comme toujours et inévitablement porteuses d'idées hayekéennes. Dans le témoignage de Banos, ainsi que dans la philosophie de ComMod, la complexité se manifeste toujours dans les interdépendances, mais la vision idéologique qui accompagne, justifie et naturalise la règle du 80/20 ou du *rich gets richer* – souvent observée dans les réseaux – est refusée et remplacée par un *imaginaire sociotechnique* qui accompagne, justifie et construit explicitement une société coopérative plutôt que compétitive. Cela passe, par ailleurs, par une illustration des dysfonctionnements du système actuel :

> « l'idée c'est d'essayer d'amener tous ces gens à construire quelque chose de manière différente et de leur faire prendre conscience du fait qu'ils sont tous dépendants les uns des autres et qu'il faut trouver d'autres modes de fonctionnement, et ça permet aussi d'exhiber et de révéler les dysfonctionnements du système [actuel] »[2611].

Pour le directeur de Géographie-Cités, il s'agit de réintroduire le niveau culturel à l'intérieur des systèmes complexes :

> « l'idée c'est que ça peut permettre de construire une vraie participation publique au sens où les individus participent à tous ces mécanismes qui relèvent de la régulation épidémique en santé publique avec des stratégies qui sont des stratégies intéressantes globalement, mais qui soient ancrées dans notre comportement individuel. Cela contribue à créer une culture du risque »[2612].

Le terme fondamental est toujours celui de régulation : un système est intégré, interdépendant, soumis à des fonctionnements en partie mécaniques. Dans la *communauté des systèmes complexes symétriques* il s'agit de fournir aux composants d'un système à la fois la connaissance de ce système, la conscience de leur place à l'intérieur du système et enfin les outils pour intervenir sur l'ensemble dont ils font partie.

Communauté de la prémédiation centralisée

Malgré nous ayons visité des lieux aussi variés que Boston, Los Alamos, Paris et Turin pour interviewer les membres d'un certain nombre d'équipes d'épidémiologistes computationnels, force est de constater l'homogénéité prosopographique, culturelle et institutionnelle de ces chercheurs et de ces chercheuses. Même si le nombre

[2611] *Ibid.*
[2612] *Ibid.*

d'interviewés issus de ce groupe est plus grand que celui des géographes de la *communauté de l'innovation libérale*, on observe moins de variabilité interne à ce groupe social. Ce qui rend ses membres si homogènes ce ne sont pas seulement les *cultures épistémiques* de leurs parcours similaires, ce sont aussi leurs *engagements épistémiques* qui le soudent. Les équipes d'épidémiologie computationnelle qui existent dans le monde se connaissent toutes entre elles et, au-delà de se rencontrer périodiquement dans des conférences, elles collaborent parfois de manière ponctuelle, soit dans des projets, soit dans des publications, soit dans la collecte des données, soit dans le travail de *lobbying* auprès des autorités publiques nationales et internationales à qui elles demandent la mise en place de certaines infrastructures de surveillance épidémique.

Disciplines et techniques mobilisées

D'un point de vue des connaissances mobilisées et de la vision de leur objet d'étude, cette communauté peut être définie comme *bio-computationnelle*. Sven Opitz a soutenu que la modélisation de toute contagion implique la modélisation des connexions matérielles de la vie sociale et que donc cela est une manifestation de la tendance à comprendre le social à travers le regard du biologique[2613]. Nous soutenons que celle-ci n'est qu'une des étapes du glissement métaphorico-métaphysique que contribue à opérer l'épidémiologie computationnelle, ainsi que la théorie des réseaux et les SSC en général. Ce qui est modélisé par nos interviewés est la diffusion d'un pathogène dans un réseau sociotechnique : cela repose sur une métaphore biologique certes, celle de l'infectivité, mais cette dernière repose à son tour et plus profondément sur une métaphore computationnelle : l'infection circule comme un électron dans un réseau électrique. Cela est frappant dans le cas d'un modèle planétaire tel que GLEaMviz (fig. 31), mais reste tout à fait visible dans une plateforme qui intègre la théorie des réseaux à un échafaudage MBA comme EpiSimS (fig. 32). Dans les deux cas, la fluidité, l'immédiateté, l'immatérialité de la diffusion rend secondaires les frictions biologiques, les limites culturelles, les espaces politiques, les frontières nationales et géographiques. Tout est connecté à tout sans entraves, chaque point étant accessible à tout autre point du globe ou de la région prise en considération. Dans le cas de GLEaM, la modélisation du réseau de transport – notamment avions, trains et voitures – annule les frontières géographiques et politiques ; dans le cas d'EpiSimS l'annulation des frontières est le fait de la modélisation des relations sociales – interprétées comme des interactions sociales dans des espaces caractérisés par leur fonction (fig. 33). Des points lointains – villes ou individus – sont rendus interconnectés et décrits comme engagés dans une communication en flux continu. L'infection est ainsi modélisée par le biais de la physique statistique, à travers des outils mathématiques qui ramènent la matérialité biologique, humaine, physique et

[2613] Opitz, S., « Simulating the world », *op. cit.*

technique au niveau d'un gaz ou d'un fluide. Les savoirs épidémiologiques servent de réservoir terminologique pour nommer les variables, pour caractériser les équations et pour borner la dynamique du phénomène modélisé (fig. 34).



Figure 31. Image de GLEaMviz qui représente de manière tridimensionnelle les vols qui connectent les différentes villes du monde. Tirée de http://www.gleamviz.org/simulator/

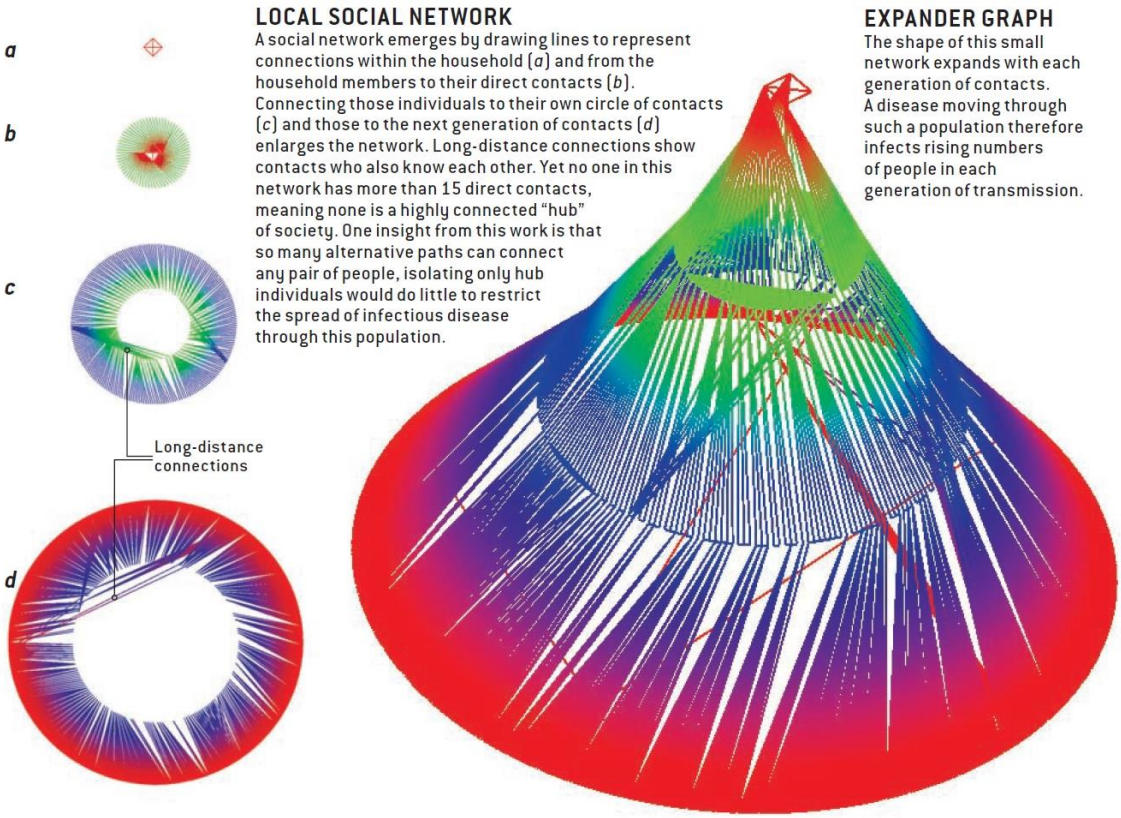


Figure 32. Image d'une analyse de réseaux appliquée au MBA d'EpiSimS. Tirée de Barrett, C.L., Eubank, S.G. & Smith, J.P., « If smallpox strikes Portland », Scientific American, 2005, vol. 3, n. 292, p. 58

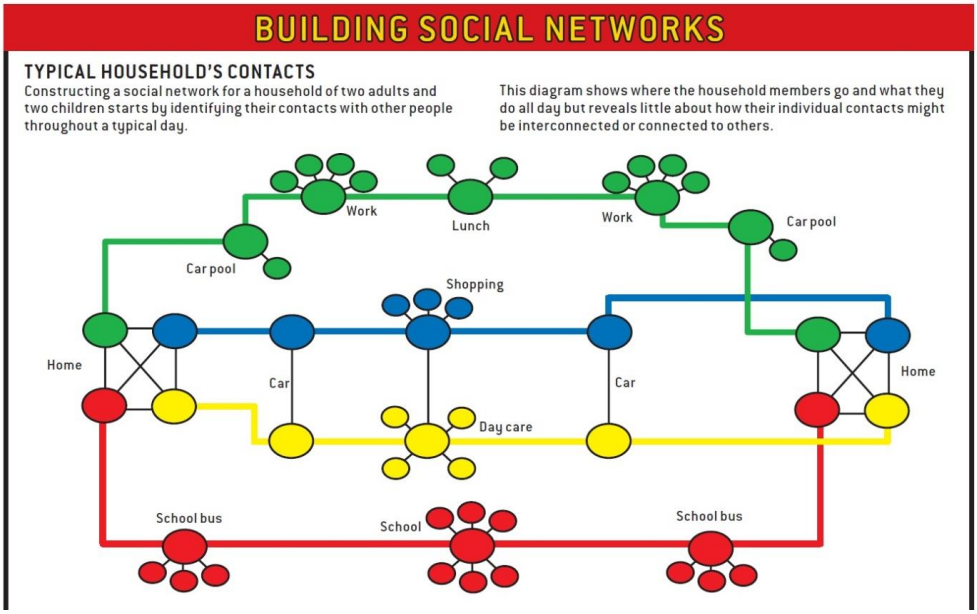


Figure 33. Tiré de Barrett, C.L., Eubank, S.G. & Smith, J.P., « If smallpox strikes Portland », Scientific American, 2005, vol. 3, n. 292, p. 58

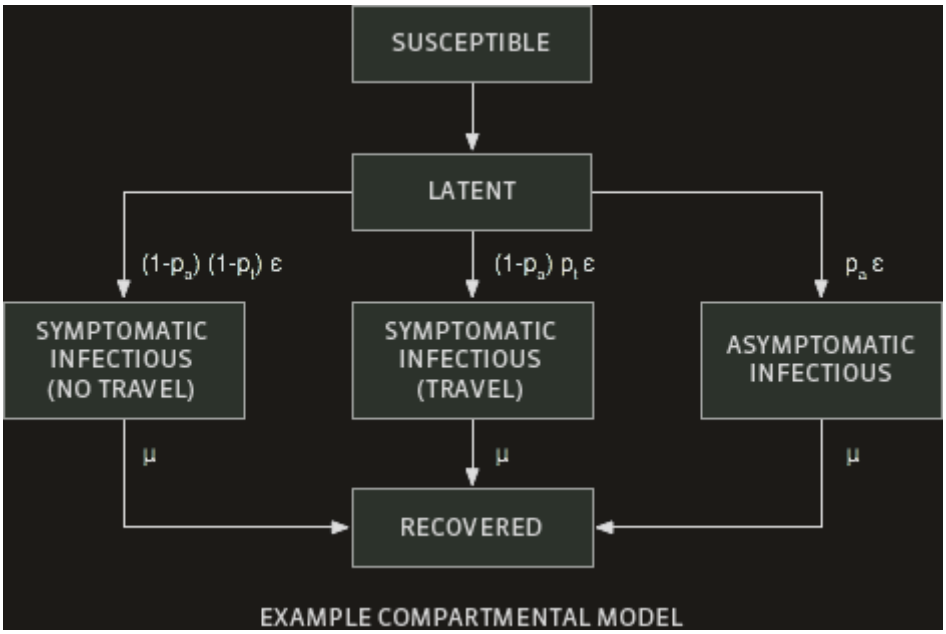


Figure 34. Les différents états des populations de GLEaMviz sont nommés d'après le langage épidémiologique. Tiré de http://www.gleamviz.org/model/

Activités transépistémiques

Avec les épidémiologistes computationnels, on revient à l'idée qui était de la *communauté de l'innovation libérale* d'une science neutre ou, du moins, qui devrait s'efforcer de l'être. D'après Alessandro Vespignani, le scientifique ne doit pas proposer au décideur une analyse qui contienne subrepticement un choix :

> « Selon moi, ça c'est le mauvais point de vue sur le rapport scientifique-décideur politique, ce type de relation est très arrogante de la part du scientifique, c'est-à-dire

> que moi je n'ai pas la vérité et puis je dois te la proposer pour que tu la perçoives de manière correcte, c'est pas comme ça. […] [Les décideurs politiques] ont besoin de certaines choses […] c'est un dialogue […]. Un *policy maker* veut savoir ce qui va se passer demain, dans quinze jours, dans un an et puis il veut savoir quelle est la manière la meilleure pour éviter que ces choses se passent. […] le problème du modèle c'est que normalement il n'y a pas une réponse 'oui ou non' […] alors à un moment donné il faut voir comment tu réussis à communiquer le message de manière appropriée, compréhensible et en même temps rigoureuse, et cela sans faire de choix, parce que c'est [au décideur politique] de faire des choix, tandis qu'en tant que scientifique tu peux proposer l'information de manière à insérer déjà le choix dedans, mais cela ne doit pas se faire »[2614].

Vespignani reproche à certains collègues d'essayer d'imposer leur modèle aux décideurs, dans la conviction que le leur soit le plus correct. Il leur reproche d'insérer des biais qui peuvent désorienter les décideurs et les mener à prendre des décisions incorrectes. Ce qui est intéressant, c'est le cadre dans lequel ce travail de conseil et d'expertise prétendument neutre est mené.

Que cela soit en Europe ou aux États-Unis, les épidémiologistes computationnels que nous avons interviewés regardent à la météorologie comme modèle. Leur objectif est d'arriver à une infrastructure mondiale de surveillance afin de fournir aux décideurs et aux populations du *forecasting* épidémique : certains de nos interlocuteurs l'appellent « meteorological computational epidemiology »[2615] et écrivent des articles d'opinion en sa faveur[2616]. Cependant, la spécificité des chercheurs et des chercheuses travaillant sur le sol étatsunien réside dans leur travail de *lobbying* auprès de la Maison Blanche afin de constituer une nouvelle agence nationale de surveillance épidémique, sur le modèle de la National Oceanic and Atmospheric Agency (NOAA). Le projet n'est pas de coordonner un contrôle sanitaire fédéral, car le Center for Disease Control et le National Institute of Health accomplissent déjà cette mission. L'équipe de LANL 1[2617] à Los Alamos et celle de Vespignani à Boston ne sont pas les seules qui, de manière à la fois autonome et coordonnée, font pression à Washington pour mettre en place ce nouvel organisme. En France et en Italie, les équipes liées à Vespignani n'ont pas de projets similaires, les instituts de veille sanitaire de ces pays étant des interlocuteurs considérés comme suffisants.

[2614] Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
[2615] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.
[2616] Moran, K.R., Fairchild, G., Generous, N., Hickmann, K., Osthus, D., Priedhorsky, R., Hyman, J. & Del Valle, S.Y., « Epidemic Forecasting is Messier Than Weather Forecasting : The Role of Human Behavior and Internet Data Streams in Epidemic Forecast », *The Journal of Infectious Diseases*, 2016, vol. 214, n. 4, pp. 404–440.
[2617] Comme nous l'expliquons dans l'Annexe II, les interviewés issus du Los Alamos National Laboratory nous ont demandé de rester anonymes. Nous avons donc remplacé leurs noms par des codes.

D'après LANL 5, les commissaires à la santé publique sont peu nombreux, très chargés et imperméables à des outils qui ne rentrent pas dans leurs flux de travail habituels : « they don't have time to… if the tool doesn't fit in their immediate workflow, they are not going to adopt it »[2618]. L'objectif des épidémiologistes computationnels reste de leur faire adopter, par un « processus de socialisation », les outils numériques qu'ils produisent, afin de les faire devenir une « routine » dans le domaine de la santé publique, national d'abord et planétaire ensuite[2619]. Comme dans la météorologie il y a plusieurs modèles concurrents qui sont souvent complémentaires[2620], de même ici on envisage une pluralité de modèles et de méthodes qui tournent sur des données empiriques en flux continu pour fournir des prédictions en temps réel de la probabilité d'être exposé à une certaine maladie. Dans le raisonnement de LANL 5, qui ne parle pas qu'à titre personnel, il faut une vingtaine d'années pour qu'un cycle technologique fasse son tour, depuis la création de l'innovation jusqu'à son adoption générale : si dix ans se sont écoulés depuis l'essor des méthodes numériques liées à l'étude des épidémies, argumente-t-il, dix ans restent encore à parcourir avant leur complète adoption. LANL 5 doute qu'une telle institution planétaire soit fondée par l'Organisation Mondiale de la Santé : il suppose plutôt qu'il s'agira d'un centre national qui effectuera une surveillance épidémique globale mais qui partagera les résultats de ses modèles sur les médias, comme le font les centres de prévision météorologique :

> « I don't think you're going to have […] a world health organization of disease […] I think it's going to be set up nationally. In terms of the structure I don't know […] But I do think that from a management perspective, if you don't assign something to someone it doesn't get done. So I think there needs to be a single organization somewhere, probably in the US government or at […] an equivalent national level somewhere else in the world, that has the responsibility of doing this. And how that structure sets up whether they pull in experts from elsewhere or they maintain an in-house capability I don't know, but I think there should probably be some organization that has the specific explicit mission to do this kind of global disease forecasting and provide it as a public good much like you would with the weather forecasting »[2621].

Un tel *centre de calcul*, point d'un « réseau » infrastructurel computationnel global, serait composé d'épidémiologistes, d'informaticiens, de commissaires à la santé publique et serait doté d'une puissance de calcul conséquente. Quant aux décideurs

[2618] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.
[2619] *Ibid.*
[2620] Car un modèle peut être plus performant pour un certain phénomène climatique, tandis qu'un autre peut l'être pour un autre phénomène.
[2621] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.

politiques, il n'y en aurait pas *in situ* ; comme le dit LANL 1, ils seraient en revanche libres d'utiliser, ou pas, les résultats des simulations disponibles en ligne, pour prendre des décisions : « Just like how you see the results for weather on the internet and then based on the forecast, then policy makers would decide whether or not they need to do something and vaccinate people »[2622]. Selon Vespignani, il faut une « écologie » de modèles qui résulte « robuste » et qui puisse se déployer lors d'une crise épidémique[2623]. Face à ce déploiement, ce qui incombe aux décideurs, d'après ce chercheur, c'est de « mettre ensemble tous ces morceaux et de les utiliser en même temps »[2624]. Accessoirement, nos interlocuteurs imaginent des applications pour *smartphone* qui, en bas ou à côté du cadre qu'ils affichent à l'écran pour la météo, affichent également un petit cadre dédié aux pourcentages d'être infectés par une maladie donné à un endroit donné, à un moment donné.

Vespignani rappelle l'existence, dans le cas des sciences du climat, de la *métrologie*. La caractéristique de celle-ci est sa relative invisibilité, malgré le fait qu'elle coûte très cher pour être entretenue : « n'oublions pas, dit Vespignani, que les infrastructures météorologiques coûtent des milliards de dollars […] à tous les pays »[2625]. Puisque pour l'épidémiologie « il n'y a même pas un millième de ce type d'infrastructure », l'ex-physicien argumente que dans tous les cas il ne faudrait pas de dépenses aussi grandes que celles nécessaires pour monitorer le climat[2626]. La surveillance sanitaire serait surtout de « terrain » et les coûts seraient réduits par le moindre besoin d'un tel *forecasting* : « l'infrastructure météorologique a des coûts qu'on soutient parce que chaque jour on a besoin de la météorologie, en revanche souvent avec les épidémies on en a besoin une fois tous les deux ans »[2627]. D'après Vespignani, pour assurer des prévisions épidémiques de bonne qualité, on devrait avoir des « laboratoires diagnostics » dans chaque pays, y compris dans les zones rurales, « tout cela connecté via satellite pour une analyse de données immédiate »[2628]. Selon lui, c'est « beaucoup plus facile de faire cela que les prévisions météorologiques »[2629]. Qui plus est, en modélisant les habitudes des personnes, les modèles-simulations épidémiologiques pourraient en outre inclure des maladies non-contagieuses, comme le cancer ou l'obésité, qui ont de formes de diffusion « sociale » comparables à des phénomènes de contagion[2630]. Selon le chercheur italien, les limites à tout cela ne sont pas théoriques, mais résident plutôt dans la « lenteur » des systèmes sanitaires et dans les intérêts pharmaceutiques. Comme LANL 5, Vespignani pense que le déploiement computationnel devrait se faire en essaimant plein de laboratoires comme le sien

[2622] Entretien avec LANL 1, 29.09.16.
[2623] Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
[2624] *Ibid.*
[2625] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2626] *Ibid.*
[2627] *Ibid.*
[2628] Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
[2629] *Ibid.*
[2630] *Ibid.*

partout dans le monde, pour qu'ensuite ceux-ci fassent un consortium matérialisé dans une « infrastructure centralisée », situé dans un seul pays[2631]. Même si les infrastructures mondiales pour l'épidémiologie computationnelle ne sont pas encore en place, dans l'idéal de LANL 1 et de ses collègues il y a la possibilité que chaque pays ait son propre *forecasting* épidémique national : « I think ideally it would be nice if everybody has a world model which is where we are aiming for »[2632]. En tout cas, ce sur quoi elle et ses collaborateurs travaillent, c'est une base de données mondiale qui puisse capter les *Big Data* de chaque pays : « so we want to get internet data from everywhere. […] it doesn't matter what disease, it doesn't matter what place, it would be nice to do it for everything »[2633].

Sur le plan politique, Vespignani explique que le CDC – organisme de surveillance, de recherche, de décision et d'implémentation des campagnes – et le NIH – organisme uniquement de recherche – sollicitent de plus en plus les épidémiologistes computationnels, qui commencent donc à gagner en légitimé. Il relate que le rythme avec lequel lui et son équipe rentrent en contact avec des interfaces du gouvernement américain est « assez constant »[2634]. Ce sont des rapports qui, selon Vespignani, se construisent « peu à peu avec humilité »[2635], l'objectif étant de « creuser une voie », un canal de communication régulier avec les centres décisionnels. Dans cette optique-là, le chercheur italien participe au groupe Models of Infectious Disease Agent Study ou MIDAS[2636], « une grande initiative aux États-Unis pour avoir en quelque sorte un pool de *modelers* qui parlent aussi avec les *policy makers* »[2637]. Il se dit prudent et explique que la fiabilité des modèles ne peut se construire qu'à partir d'une collaboration avec les pouvoirs publics, avec lesquels construire au fur et à mesure un langage commun :

> « dans la lecture des résultats des modèles on doit être très très prudents. Ça c'est un rapport qui se développe à deux, en travaillant beaucoup ensemble [aux pouvoirs publics], donc en ce sens à chaque fois qu'il y a une crise épidémiologique, ça c'est une occasion pour travailler ensemble, pour développer un langage commun, donc en quelque sorte pouvoir s'améliorer le long du chemin »[2638].

Vittoria Colizza le rejoint sur ce point : « *Question :* Comment les décideurs politiques se sont convaincus que vos méthodes computationnelles étaient fiables ? *Colizza :* Et bien parce qu'on a commencé à travailler avec eux […] on a commencé à travailler

[2631] *Ibid.*
[2632] Entretien avec LANL 1, 29.09.16.
[2633] *Ibid.*
[2634] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2635] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2636] Site officiel du MIDAS : https://www.nigms.nih.gov/Research/specificareas/MIDAS/Pages/default.aspx.
[2637] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2638] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.

suivant leurs requêtes »[2639]. Pour cette raison, Colizza en France, tout comme Daniela Paolotti en Italie, discutent régulièrement avec les instituts de santé nationaux. Aux États-Unis, Vespignani travaille aussi à l'*outreach* : lors de notre entretien dans son laboratoire bostonien, il nous a montré l'une des premières versions d'un livre d'images issues de l'épidémiologie computationnelle qui était destiné au grand public et aux décideurs politiques. Cette espèce de « *coffee table book* », comme le chercheur le qualifie, vise à illustrer « ce que veut dire faire de l'épidémiologie computationnelle »[2640]. Il s'agit, d'après Vespignani, d'un état de l'art de la sous-discipline qui soit « esthétiquement plaisant »[2641]. L'expert de *data visualization* Mauro Martino, qui collabore avec Vespignani, nous a expliqué que son travail de visualisation des données sert au laboratoire pour rendre cohérent et intelligible le travail mené par les chercheurs et les chercheuses qui le composent. Cela à travers la possibilité, donnée par les images, de « créer une narration »[2642]. Vespignani, qui confirme que la visualisation peut permettre aux membres du laboratoire de voir des « anomalies » qui n'avaient pas été repérées jusque-là, étend cette fonction narrative à tout autre travail de promotion que le laboratoire peut réaliser au bénéfice du grand public et des décideurs politiques, dans la conviction que la visualisation est une manière « très puissante » d'engager le spectateur[2643]. Si la narration pour les collègues peut être « sophistiquée », celle pour le grand public doit permettre le « *wow factor* », tandis que pour les décideurs l'image doit véhiculer « des informations-clés de manière très synthétique »[2644].

À Paris, Colizza travaille à l'INSERM et collabore avec l'agence nationale de santé publique, qui s'appelle Santé publique France et qui désormais englobe sous le même chapeau trois organismes qui lui préexistaient (InVS, IPES et EPRUS)[2645]. Interface entre l'INSERM et le Ministère de la Santé, SpF a comme tâches principales la préparation de protocoles sanitaires et la production de recommandations. Dans cet écosystème triadique, la surveillance est enfin déployée sur le territoire à travers un dispositif composé de nombreux médecins généralistes qui collectent des informations sur certaines maladies et les font remonter avec une cadence hebdomadaire au « Réseau Sentinelle », une collaboration entre INSERM, Université Pierre et Marie Curie et Santé publique France[2646]. Fondé en 1984, ce Réseau était composé de deux parties jusqu'en 2014, après quoi elles ont fusionné : d'une part la surveillance des maladies de type grippal (grippe, influenza, varicelle, rougeole, etc.), et d'autre part la surveillance de l'infection respiratoire aigue.

[2639] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.
[2640] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2641] *Ibid.*
[2642] Entretien avec Mauro Martino, 12.09.16.
[2643] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
[2644] *Ibid.*
[2645] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.
[2646] *Ibid.*

Un autre dispositif dans lequel Colizza est engagée implique également l'équipe de Turin : il porte le nom d'Influenzanet et il s'agit d'un portail de surveillance participative. Crée en 2004 par des équipes hollandaises et belges, ce dispositif a été ensuite adopté par le Portugal. En 2007-2008, avec Paolotti, Colizza s'est rendue à Lisbonne pour étudier le dispositif de près et pour travailler sur le développement de la version italienne du site : Influweb. Une fois arrivée à l'INSERM de Paris et une fois commencé la collaboration avec le Réseau Sentinelle, Colizza a commencé à développer la version française du site : Gripnet. Ce dispositif a « été accueilli avec un grand enthousiasme par l'équipe du Réseau Sentinelle » et avec plus de scepticisme par Santé publique France[2647]. Quoiqu'il en soit, Colizza tisse l'éloge du système français par rapport aux autres qu'elle a connus, du fait que l'intégration entre terrain, recherche et décision y est forte :

> « Il y a, je dois dire, certains pays, dont la France, où il y a une grande attention à l'intégration entre chercheurs et santé publique et il y a une volonté forte de créer ce lien et disons de l'huiler même en ces temps de paix, de manière à que, en cas d'urgence, les chercheurs et les officiers de santé publique sachent vers qui se tourner »[2648].

Cet échange n'est pas unidirectionnel : les scientifiques ne sont pas uniquement une ressource à interpeller de la part des décideurs et des commissaires à l'occasion d'une épidémie. Le dialogue avec SpF sert aux scientifiques pour savoir « quelles données sont collectées », voire pour participer à la rédaction des protocoles pour les collecter[2649]. Dans le cas du MERS-coronavirus, l'équipe de Colizza et celle de SpF ont collaboré depuis la phase de collecte des données jusqu'à la publication d'un article scientifique écrit en commun. À l'heure actuelle, et depuis 2016, les contacts entre l'équipe de Colizza et celle de SpF sont devenus périodiques, par le biais d'une newsletter hebdomadaire et à travers des réunions physiques plus distanciées : « une tous les deux ou trois mois, pendant une journée entière, dont la première moitié en général avec des présentations brèves où le but est, disons, d'élargir ce dialogue que j'avais construit de manière absolument personnelle »[2650].
Comme l'équipe de Colizza, celle de l'ISI de Turin interagit avec l'organisme de recherche sanitaire et de surveillance italien : l'Institut Supérieur de la Santé. Comme en France, les décisions sont prises par le Ministère de la Santé, mais l'ISS les informe avec plusieurs scénarios, qui sont accompagnés de plusieurs recommandations spécifiques[2651]. Paolotti a commencé son travail d'épidémiologiste computationnelle

[2647] *Ibid.*
[2648] *Ibid.*
[2649] *Ibid.*
[2650] *Ibid.*
[2651] Entretien avec Caterina Rizzo, 16.07.18.

en 2009 avec le projet européen EPIWORK dirigé par Vespignani[2652]. Ce projet a permis aux équipes impliquées de développer GLEaM mais aussi Influenzanet, qui d'après la chercheuse a eu un succès remarquable : « Ce qui était né comme un petit projet fait maison par nous avec notre petit site italien, maintenant c'est un network d'onze pays, adopté par les systèmes de santé publique de France, Royaume Uni, Italie, Danemark et Portugal »[2653]. Elle relate que dans tous les pays impliqués, les décideurs ont montré de l'intérêt, jusqu'à intégrer Influenzanet parmi leurs outils de récolte des données. Au niveau européen, notamment auprès de l'European Center of Disease Control, elle regrette en revanche le fait que les épidémiologistes computationnels et digitaux aient trouvé un « mur de silence »[2654]. Entité non-opérationnelle, l'ECDC « doit se conformer à ce que décident les États membres » : « le groupe de *modeling* a été fermé, donc ils ne sont pas très clairvoyants »[2655].
Quant à l'Italie, Paolotti nous a expliqué que les données collectées par le portail sont transférées à un rythme hebdomadaire à l'ISS : « même les opérateurs sanitaires nationaux savent qui nous sommes, ils utilisent nos données »[2656]. Comme dans le cas français, le rapport entre l'ISI et cet organisme est constant et, selon les scientifiques, fructueux. La présence d'un médecin épidémiologiste sensibilisé aux méthodes computationnelles au sein de l'ISS facilité les échanges[2657]. Puisqu'Influenzanet est un portail participatif, il a fallu que les différents porteurs du projet en parlent dans les médias de leurs pays pour attirer des volontaires. Telle collecte de données n'a « rien à voir avec les systèmes complexes », lesquels en revanche forment la base théorique de GLEaM[2658]. Cette plateforme peut en revanche être nourrie du matériau provenant d'Influenzanet.

Imaginaire sociotechnique

L'*imaginaire sociotechnique* des épidémiologistes computationnels repose sur cinq piliers. Primo, le serment d'Hippocrate car, comme toutes les catégories afférentes au domaine de la santé publique, l'objectif premier de nos interlocuteurs est celui de sauver des vies humaines. Le deuxième pilier, qui est explicitement verbalisé par tous nos interviewés, est l'optimisation des systèmes économique et étatique en vigueur. Le troisième pilier est l'attitude à *prémédiatiser* le futur : la *prémédiation* est un concept du « massmédiologue » américain Richard Grusin, dont on va illustrer la signification par la suite. Quant au quatrième pilier, il concerne la vision de l'ordre social, l'image d'un État central fort étant pour les épidémiologistes indispensable à la fois pour la collecte des données que pour l'implémentation des politiques sanitaires. Cet aspect va

[2652] Site officiel d'EPIWORK : https://cordis.europa.eu/project/rcn/89255_en.html.
[2653] Entretien avec Daniela Paolotti, 16.02.17.
[2654] *Ibid.*
[2655] *Ibid.*
[2656] *Ibid.*
[2657] Entretien avec Caterina Rizzo, 16.07.18.
[2658] Entretien avec Daniela Paolotti, 16.02.17.

de pair avec le dernier pilier, qui concerne la vision de l'expertise et du rôle des citoyens et des citoyennes : les épidémiologistes computationnels que nous avons interviewés s'inscrivent dans le *modèle de l'instruction publique* tel qu'il a été défini par Michel Callon.

Prenons le cas des épidémiologistes de Los Alamos. Si à Boston Vespignani milite pour l'*open data*, à Los Alamos LANL 5 pense de son côté que le système de surveillance épidémique doit se construire en s'adaptant aux nécessités des entreprises, et non pas l'inverse. Le jeune chercheur se pose une question morale et technique : « should you build a public health system on a proprietary data source ? »[2659]. Si d'une part l'État a la fonction de fournir des services à la collectivité que l'industrie privée ne peut ou ne veut pas fournir, d'autre part il ne faut pas, d'après lui, imposer aux compagnies privées de fournir gratuitement à l'État les données qui lui sont nécessaires pour la surveillance et le *forecasting* épidémique. Lorsque le gouvernement fédéral américain souhaitera construire une infrastructure finalisée, selon LANL 5 c'est à cette entité de s'adapter aux besoins du monde privé et donc de prévoir des modalités de surveillance qui puissent se passer des achats de données onéreux auprès des entreprises. Le chercheur se dit fortement *pro-business* ; d'une part il souhaiterait que les entreprises lui cèdent leurs données gratuitement, mais d'autre part il ne militerait pas pour les obliger à le faire. Il critique donc ceux et celles qui, dans le domaine de l'épidémiologie computationnelle ou parmi les décideurs, pensent que la gratuité des données est un acquis :

> « *LANL 5 :* It's a moral problem […] there is a reason governments exist, they are to provide services that sometimes private industry cannot […]
> *Question :* They should give it for free according to you?
> *LANL 5 :* I mean no, I'm not saying they should give it for free, they are a business. I'm saying when you're designing a system, you have to be aware of that and I think there is this assumption […] that data will be provided for free forever, which I don't think is a safe assumption. I don't fault the businesses because businesses need to do what they need to do to…
> *Question :* No, I mean one could imagine that the business does its business, but that it gives those data for free to the public health, just to them.
> *LANL 5 :* But that's up to the company and I can't… I mean I don't think they have to. It'd be nice, I'd love it.
> *Question :* But you would negotiate for it ?
> *LANL 5 :* I mean I would try, I would ask using the same argument you said, but I think business… I mean I'm very pro-business and they need to do what they need

[2659] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.

to do to stay […] what I'm saying is when you build this global system, when you rely on a data source, you've got to think about that whole cycle »[2660].

Cet extrait n'est pas anecdotique, car il s'agit d'un premier élément pour caractériser le deuxième point constitutif de l'*imaginaire sociotechnique* des épidémiologistes. Le même sentiment de protection envers les entreprises détentrices des données est manifesté par LANL 5 vis-à-vis du secteur économique dans son entièreté. Si le système météorologique sert au trafic aérien ainsi qu'aux besoins militaires, avant qu'il ne nous serve pour des raisons conviviales, le dispositif de surveillance épidémique (actuel et futur) a, comme le dit LANL 5, également un intérêt commercial : « Yeah I mean I think there's a commercial interest too. Think about how many work days get lost from illness from companies and businesses »[2661]. Bien sûr, les bénéfices en efficience sanitaire de ce dispositif concernent tout autant le système public. Comme la météorologie sert à déplanifier ou à rediriger les routes des cargos, des vols de ligne et des priorités assurantielles, une *vast machine* de surveillance épidémique permettrait d'affecter plus efficacement par exemple les interventions de santé publique :

« if it's a hurricane and I know the hurricane is going to hit, I can figure out where this hurricane is going to hit and I can allocate the minimal resources we do have to focus on that area kind of like insurance. […] I think you can have something like that with disease. The way the disease impacts in a country is not homogenous […] so you can focus these resources on hotspots »[2662].

La surveillance épidémique servirait ainsi à huiler le système socio-économique pour lui permettre de subir moins de pertes, humaines ou matérielles. Les cycles de grippe annuels comportent des pertes en termes d'« heures de travail humain » pour le monde productif et des services. En prévoir l'arrivée permettrait d'avoir le choix de déployer un système de vaccination conséquent :

« companies get sick of how many man hours of labor get wasted every year from people getting sick because they didn't get a flu vaccine. If you could better say, 'Hey it seems like in the next three weeks you're going to have a real large amount of flu in your region. Tell your employees to get flu shots' or perhaps as a company you'll decide, 'We'll offer free flu shots for our employees'. You might be able to actually I think create a net positive economic benefit for that company »[2663].

[2660] *Ibid.*
[2661] *Ibid.*
[2662] *Ibid.*
[2663] *Ibid.*

D'un tel appareil de surveillance bénéficierait également le système hospitalier, car les cliniques pourraient déployer en avance les ressources matérielles et humaines pour faire face à une épidémie : « Same thing with hospitals, hospitals have issues with bed shortages and staffing. [Epidemic forecast] can better predict hospitalizations for certain conditions, you can better allocate resources efficiently to that »[2664]. À la lumière de ces témoignages, nous paraît pertinente la suggestion du philosophe Claus Pias. Dans un article sur l'épistémologie de la simulation numérique, il cite et analyse, parmi d'autres exemples, la plateforme EpiSimS du LANL. Il y affirme ensuite que la plateforme de modélisation épidémique du LANL est « une sorte de signature de l'âge du libéralisme » et en même temps un laboratoire *in silico* pour expérimenter sur la société un nouveau style de gouvernance :

> « agent-based computer simulations that do not only study real infectious diseases but instead oversee and manage the transmittal aspects of them in addition to their economic, social and health facets as a single communicative complex that allows for all kinds of inquiries into the positions and exchange between people and things – these simulations are not only a kind of signature of the age of liberalism but at one and the same time a media instrument for obtaining insights into society as well as a scientific field of experimentation for this new style of governance »[2665].

Dans cette optique d'optimisation, l'État n'est pas distinct de l'entreprise en ce qui concerne l'efficacité de l'emploi des ressources. Ainsi, outre qu'optimiser le bon fonctionnement des commerces et des industries, le *forecasting* épidémique permet de rationaliser également les ressources publiques dans la phase de *preparedness*[2666], pour les adresser aux sous-populations prioritaires, du fait qu'« il n'y a pas suffisamment d'argent pour aller sauver tout le monde » :

> « If you know where it's going to be worse, you can take your limited resources and focus on there and optimize your control so that you can maximize the benefits in terms of the lives saved, because there's not enough money to go around and save everyone. You can't do every control action possible, you have a finite number of resources and you need to figure out, 'Okay, how do I best distribute these finite resources […] ?' »[2667].

Si l'accent « pro-business » peut être propre au seul LANL 5, en Europe les problématiques agroalimentaires ont en fait déjà impliqué plusieurs de nos

[2664] *Ibid.*
[2665] Pias, C., « On the Epistemology of Computer Simulation », *op. cit.*
[2666] « Le *preparedness* c'est se préparer pour une pandémie. Prévention c'est 'éviter que'. *Preparedness* indique les mesures à mettre en vigueur » : entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2667] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.

interlocuteurs. Colizza, qui garde un pied en Italie, travaille avec l'Institut Zooprophylactique des régions des Abruzzes et du Molise. Ce dernier est mandaté par le Ministère de la Santé pour surveiller les maladies du bétail, d'autant plus que certaines peuvent faire ce que les épidémiologistes ou les vétérinaires appellent le « saut de l'espèce ». D'après Colizza, ce type de surveillance a un impact sur la santé publique, sur les comportements sociaux et sur l'économie :

> « [Le travail avec l'Institut Zooprophylactique] est tout autre chose [par rapport au travail avec l'INSERM et avec SpF], qui a un impact de santé publique, un impact social parce que ça change les habitudes alimentaires d'un pays au moment où il y a des maladies qui frappent […] le bétail, […] [et] un énorme impact économique »[2668].

Dans un article de 2015, l'équipe de Colizza publie un article sur l'évaluation des risques épidémiques dans les élevages de bétail[2669]. L'objectif étant de limiter les pertes, la manière pour y arriver résulte être l'identification précoce des individus qui sont soupçonnés être les plus vulnérables face à l'essor éventuel d'une épizootie. Puisque des données en temps réel sont difficilement disponibles, argumentent les auteurs, l'exploitation des données passées peut permettre de hiérarchiser les interventions stratégiques une fois l'épizootie éclatée. L'équation centrale de l'article, qui prend la forme illustrée par la fig. 35, est une équation d'évaluation du risque pour mesurer la probabilité que chaque individu a de contracter la maladie, la variable clé étant sa « loyauté », à savoir sa tendance à rester en contact avec les mêmes individus.

We define a node's infection potential $\pi_L^{c-1,c}(s)$ ($\pi_D^{c-1,c}(s)$) measuring the probability that a node will be infected in configuration c by an epidemic starting from seed s, given that it was infected in configuration $c-1$ under the same epidemiological conditions and provided that its loyalty status is L (D):

$$\pi_L^{c-1,c}(s) \stackrel{def}{=} \text{Prob}\left[i \in \mathcal{I}_s^c \mid i \in \mathcal{I}_s^{c-1} \text{ and } i \in \{L\}\right],$$
$$\pi_D^{c-1,c}(s) \stackrel{def}{=} \text{Prob}\left[i \in \mathcal{I}_s^c \mid i \in \mathcal{I}_s^{c-1} \text{ and } i \in \{D\}\right],$$

where i is a node of the system. π_L and π_D thus quantify the effect of the temporal stability of the network at the local level (loyalty of a node) on the stability of a macroscopic process unfolding on the network (infection).

Figure 35. Équation d'évaluation du risque pour mesurer la probabilité que chaque individu d'une population de bétail a de contracter une maladie, la variable clé pour anticiper l'évolution d'une épizootie étant la « loyauté » de chaque individu, à savoir sa tendance à rester en contact avec les mêmes individus. Image tirée de Valdano, E., Poletto, C., Giovannini, A., Palma, D., Savini, L. & Colizza, V., « Predicting Epidemic Risk from Past Temporal Contact Data », PLoS Computational Biology, 2015, vol. 11, n. 3, p. 8.

[2668] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.

[2669] Valdano, E., Poletto, C., Giovannini, A., Palma, D., Savini, L. & Colizza, V., « Predicting Epidemic Risk from Past Temporal Contact Data », *PLoS Computational Biology*, 2015, vol. 11, n. 3.

Nous avons cité le terme de « *preparedness* ». « Préparation » ou « planification préalable » sont en effet les noms que les spécialistes de la santé publique donnent à l'activité de surveillance, de prévision et d'anticipation infrastructurelle qu'ils mènent afin de limiter les dégâts d'une épidémie qui menace de frapper la population. Le massmédiologue Richard Grusin interprète et inscrit ce phénomène dans un contexte médiatique et idéologique plus vaste, auquel il donne le nom de « *premediation* »[2670]. Ce concept, que nous employons pour qualifier la communauté qu'on est en train de discuter ici, se construit autour de la relation avec un autre concept que Grusin avait proposé avec Jay Bolter dans un livre précédent : « *remediation* »[2671]. La *rémédiation* se réfère à la tension entre deux logiques médiatiques contradictoires, l'immédiateté et l'hypermédiatisation, respectivement la manifestation de deux logiques hétérogènes mais qui peuvent s'entremêler : la transparence et la multiplicité. Phénomène visible, selon Grusin, dans la dernière décennie du XX^{ème} siècle, dans laquelle l'apparat médiatique a cherché à se rendre invisible en faisant proliférer différentes formes de médiatisation, la *rémédiation* se couple au phénomène de la *prémédiation*. À l'œuvre déjà avant les attentats de l'onze septembre mais s'étant intensifié après cet événement tragique, la *prémédiation* est définie par le chercheur de la manière suivante :

> « Premediation works to prevent citizens of the global mediasphere from experiencing again the kind of systemic or traumatic shock produced by the events of 9/11 by perpetuating an almost constant, low level of fear or anxiety about another terrorist attack. Premediation does not displace remediation but deploys it in different aesthetic, sociotechnical, or political formations »[2672].

La logique de la *prémédiation* inclut et exploite celle duplice de la *rémédiation*, dans le but de *préparer* mentalement le public à la catastrophe, afin que, lorsqu'elle se présente, elle ne soit pas aussi inattendue que l'attentat aux Tour Jumelles :

> « premediation characterizes the mediality of the first decade of the twenty-first century as focused on the cultural desire to make sure that the future has already been pre-mediated before it turns into the present (or the past) – in large part to try to prevent the media, and hence the American public, from being caught unawares as it was on the morning of 11 September 2001. […] however, premediation is not to be confused with prediction. Premediation is not about getting the future right, but about proliferating multiple remediations of the future both to maintain a low level of fear in the present and to prevent a recurrence of the kind of tremendous

[2670] Grusin, R., *Premediation. Affect and mediality after 9/11*, Houndmills, Palgrave Macmillan, 2010.
[2671] Grusin, R. & Bolter, J.D., *Remediation. Understanding New Media*, Cambridge, MIT Press, 1999.
[2672] Grusin, R., *Premediation, op. cit.*, p. 2.

media shock that the United States and much of the networked world experiences on 9/11 »[2673].

L'historien et philosophe allemand Sebastian Vehlken soutient que l'épidémiologie computationnelle ne rajoute pas à l'épidémiologie que des nouvelles méthodes numériques, mais aussi une tout autre perspective sociotechnique et un tout autre rapport au temps futur :

> « Agent-based epidemic simulations have been employed as an alternative way of computationally representing the spreading dynamics of contagious diseases, thereby transcending macro-scale (health) statistical analyses, and microscopic medical experiments. This introduced a novel synthetical epistemic element into epidemiology – an element of premediation […] which initiated a transformation of the temporal dynamics and timescales of response systems away from reactive modes and towards novel modes of preparedness »[2674].

En suivant Vehlken, nous pensons que l'épidémiologie computationnelle, surtout dans ce que ses porte-paroles voudraient qu'elle soit, suit cette logique de *prémédiation* « dans laquelle, comme l'explique Grusin, le futur a toujours été déjà *pré-médiatisé* »[2675]. Dans ce processus, « le futur peut être rémédiatisé avant qu'il n'advienne »[2676]. Grusin a une métaphore efficace pour illustrer son propos, quand il compare l'activité de prémédiation, qui est une cartographie des futurs possibles, à un jeu vidéo « qui permet seulement certains mouvements en fonction de la position du joueur dans l'espace du jeu »[2677]. L'activité de scénarisation des modélisateurs des épidémies opère précisément la visualisation d'un certain nombre de chemins que l'on peut prendre. Elle multiplie les futurs, en les bornant entre des intervalles de confiance, pour qu'on sache à quoi s'attendre une fois ce qu'on a anticipé va se produire : il s'agit autrement dit d'un dispositif pour ne pas être surpris devant les surprises, à partir de la conscience du fait qu'il y aura toujours une surprise, ou comme le dit Opitz : « Simulations are therefore a means of transforming indeterminate contingency into determinate contingency, paradoxically by generating multiple contingencies »[2678]. C'est précisément la multiplication de futurs possibles qui nous prédispose à l'arrivée de chacun d'entre eux, en opérant ce que Grusin appelle une « prophylaxie affective »[2679]. Notre thèse est donc que la posture de l'épidémiologie

[2673] *Ibid.*, p. 4.
[2674] Vehlken, S., « Contagious Agents. Epidemics, Networks, Computer Simulation », dans Borch, C. (ed.), *Imitation, Contagion, Suggestion*, Londres, Routledge, 2018 (en cours d'impression).
[2675] Grusin, R., *Premediation, op. cit.*, p. 38.
[2676] *Ibid.*, p. 39.
[2677] *Ibid.*, p. 46.
[2678] Opitz, S., « Simulating the world », *op. cit.*, p. 407.
[2679] Grusin, R., *Premediation, op. cit.*, p. 46.

computationnelle s'inscrive et contribue à faire vivre cet *imaginaire sociotechnique* précis : « Premediation is part of a heterogeneous media regime, one purpose of which is to make sure that, no matter what tomorrow might bring, it will always feel as if it had already been premediated or that it could have been »[2680]. Pour Grusin cette idée est étroitement connectée à l'idée de l'ubiquité des médias et à celle de vouloir « coloniser le futur »[2681] : on a en effet plusieurs extraits d'entretien ou d'articles où nos interviewés revendiquent l'importance de s'appuyer sur les *Big Data* des traces numériques, en avançant la prophétie-souhait selon laquelle on va vers l'omniprésence, tous pays et toutes classes sociales confondues, des dispositifs électroniques nécessaires à exercer la scénarisation épidémiologique :

> « Our hope is that, as electronic health records and other types of data become more ubiquitous and available to each individual via their smart phones, there will be a parallel world, similar to that for weather forecasting, where billions of sensors will be uploading real-time information to obtain personalized disease forecasts »[2682].

Quelle est l'implémentation matérielle et technique de la *prémédiation* ? Si l'on prend l'exemple de GLEaM, on verra que ses créateurs disséminent partout où ils peuvent des variables que l'usager – scientifique, commissaire ou décideur qu'il soit – peut modifier à l'envie. Par exemple, la fig. 36 montre une partie des paramètres que l'usager peut faire varier en ce qui concerne la partie du modèle compartimentée (c'est-à-dire subdivisée en susceptible, latent, contagieux, guéri, etc.), où les classes d'individus peuvent être rendues mobiles ou pas, infectées ou pas, plus ou moins contagieuses et ainsi de suite. D'autres sections du modèle permettent d'introduire le(s) site(s) où la maladie se génère et à partir desquels elle se diffuse, la saisonnalité de la maladie, le temps que prennent les déplacements des individus et bien d'autres éléments. L'activité de scénarisation résulte donc de l'articulation entre tous ces facteurs, fournissant par conséquent un espace de possibles presque illimité, notamment au début d'une épidémie, lorsque les données concernant les détails de son comportement font défaut.

Pour en venir au quatrième et cinquième pilier de l'*imaginaire sociotechnique* des épidémiologistes computationnels, il s'agit maintenant d'examiner leur vision de l'expertise et du rapport qui interconnecte, à leurs yeux, l'État, les scientifiques et le public. Il s'agit d'une division du travail dans lequel les scientifiques-experts informent, l'État choisit et exécute, et les citoyens et les citoyennes adhèrent à, et implémentent l'information et la décision des premiers. Si les géographes de la première et de la deuxième communautés n'interagissent presque jamais avec un organisme d'échelle nationale ou internationale, les épidémiologistes ont au pouvoir

[2680] *Ibid.*, p. 47.
[2681] *Ibid.*, p. 58.
[2682] Moran, K.R. et al., « Epidemic Forecasting is Messier Than Weather Forecasting », *op. cit.*, p. 407.

un rapport éminemment vertical. En outre, c'est à ce pouvoir qu'ils se tournent pour fournir leur expertise ou leurs modèles, rendus en l'occurrence « flexibles » et « *user friendly* » pour faciliter la réappropriation de la part des pouvoirs publics. Cela dit, il est intéressant de noter que le modèle ne manifeste pas la présence d'un *hub* qui administrerait les vaccins ou qui implémenterait informatiquement les autres interventions de santé publique. La centralisation de cette opération se fait dans un *template* dans lequel, parmi les nombreuses variables que l'usager peut manipuler, quatre concernent les classes d'agents ayant subi le traitement viral : dans la fig. 37, ces quatre variables vont avec l'acronyme AVT, c'est-à-dire « *antiviral treatment* ». La légende de cette image, que nous laissons en note[2683], l'illustre bien : si la variable « rAVT » indique les agents guéris après le traitement et que la variable « muAVT » désigne la durée de leur contagiosité, c'est la variable « pAVT » qui représente la fenêtre pour l'intervention gouvernementale. C'est en effet celle-ci qui indique le pourcentage d'individus qui seront vaccinés ou traités.
Tout cela n'empêche qu'il y ait des expériences participatives dans le domaine de la santé publique également et de celui de l'épidémiologie computationnelle plus en particulier. L'une de ces expériences ressemble, selon Colizza, au projet Post-car Île-de-France mené par Banos :

> « [Notre projet participatif] sur les vaccins est comme ce que tu me racontais pour [le projet Post-car]. Donc quand tu demandes à ta population, 'Ben, vous habitants de ce quartier, comment voudriez-vous ce quartier ?', avec plusieurs questions ouvertes, tu fais la même chose sur les vaccins pour chercher de comprendre quelle est ta perception par rapport aux vaccins, si tu t'es vacciné, si tu l'as pas fait… »[2684].

[2683] « A modified Susceptible-Latent-Infectious-Recovered model is considered, to take into account asymptomatic infections, traveling behavior while ill, and use of antiviral drugs as a pharmaceutical measure. In particular, infectious individuals are subdivided into: asymptomatic (Infectious_a), symptomatic individuals who travel while ill (Infectious_s_t), symptomatic individuals who restrict themselves from travel while ill (Infectious_s_nt), symptomatic individuals who undergo the antiviral treatment (Infectious_AVT). A susceptible individual interacting with an infectious person may contract the illness with rate beta and enter the latent compartment where he/she is infected but not yet infectious. The infection rate is rescaled by a factor ra in case of asymptomatic infection [41,46], and by a factor rAVT in case of a treated infection. At the end of the latency period, of average duration equal to eps-1, each latent individual becomes infectious, showing symptoms with probability 1-pa, whereas becoming asymptomatic with probability pa [41,46]. Change in travelling behavior after the onset of symptoms is modeled with probability pt set to 50% that individuals would stop travelling when ill [41]. Infectious individuals recover permanently after an average infectious period mu -1 equal to 2.5 days. We assume the antiviral treatment regimen to be administered to a 30% fraction (i.e. pAVT = 0.3) of the symptomatic infectious individuals within one day from the onset of symptoms, reducing the infectiousness and shortening the infectious period of 1 day. [41,42] » : Van den Broeck, W., Gioannini, C., Gonçalves, B., Quaggiotto, M., Colizza, V. & Vespignani, A., « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », *BMC Infectious Diseases*, 2011, vol. 11, n. 37.
[2684] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.

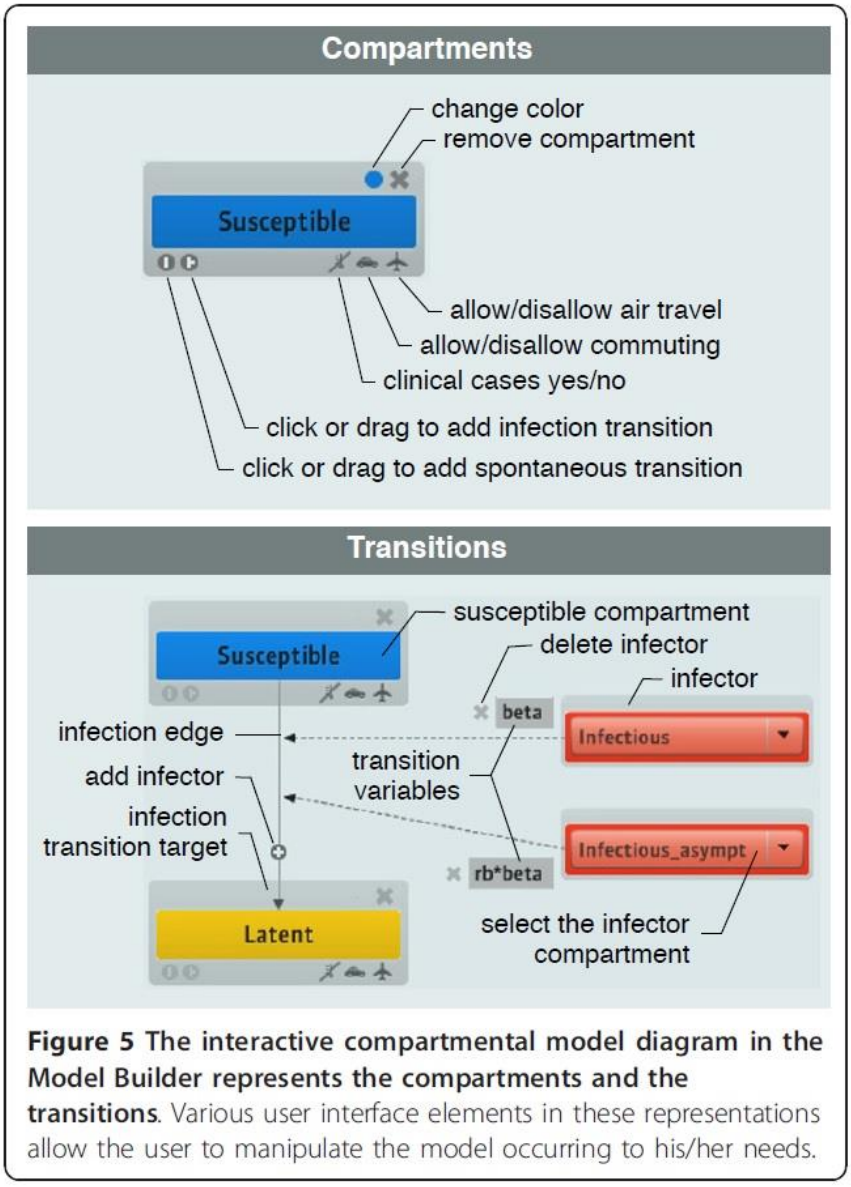


Figure 36. Voici certains des paramètres (latent, contagieux, guéri, etc.) que l'usager de GLEaMviz peut faire varier en ce qui concerne la partie du modèle compartimentée, où les classes d'individus peuvent être rendues mobiles ou pas, infectées ou pas, plus ou moins contagieuses, etc. Tiré de Van den Broeck, W., Gioannini, C., Gonçalves, B., Quaggiotto, M., Colizza, V. & Vespignani, A., « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », BMC Infecti ous Diseases, *2011, vol. 11, n. 37*

Dans cet extrait, l'épidémiologiste fait référence à des projets de surveillance par questionnaire, qui existent tant en Europe qu'aux États-Unis, dans lesquels des portails sont mis à disposition des citoyens et des citoyennes pour communiquer leur état de santé, de manière périodique et sur base volontaire. Influweb et Gripnet entrent dans cette catégorie. À propos de la participation, Colizza craint que les dispositifs qui disent l'implémenter soient plutôt une « mode » dans un contexte de « populisme

régnant et très diffus »[2685]. La chercheuse précise que la sienne n'est pas une critique de la concertation en tant que telle :

> « La mienne n'est pas une critique de la concertation, plutôt c'est une critique du fait que soudainement tous les politiques doivent la faire, c'est-à-dire c'est une critique sur la façon dont c'est mis en place ; de manière très personnelle cette chose me donne l'impression d'une mode plus que d'une véritable volonté de comprendre ce que pense le citoyen »[2686].

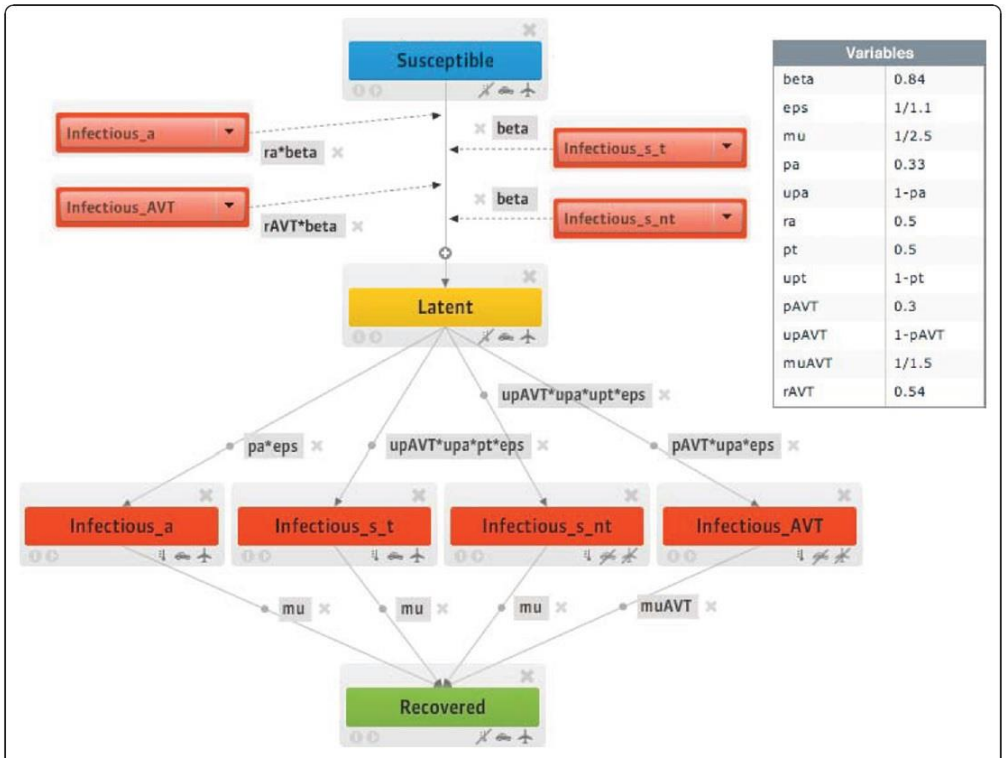


Figure 37. La centralisation de la vaccination est visible dans ce template *dans lequel, parmi les nombreuses variables que l'usager peut manipuler, quatre concernent les classes d'agents ayant subi le traitement viral et vont avec l'acronyme AVT, c'est-à-dire «* antiviral treatment *». Tiré de Van den Broeck, W., Gioannini, C., Gonçalves, B., Quaggiotto, M., Colizza, V. & Vespignani, A., « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », BMC Infect* ious Diseases*, 2011, vol. 11, n. 37*

Méthode utilisée, selon Colizza, pour rapprocher les électeurs des politiques, « ce n'est pas la seule solution » aux problèmes techno-sanitaires[2687]. Autrement dit, il s'agit pour elle de ne pas transformer la participation en une mode ni de la voir comme le seul instrument possible pour résoudre les problèmes politiques. Elle revendique souligner l'importance fondamentale de la professionnalité, du travail et de l'expertise :

[2685] *Ibid.*
[2686] *Ibid.*
[2687] *Ibid.*

> « je ne vois pas comme très facile à faire la distinction entre ce qui peut être décidé par un citoyen et ce qui ne peut pas être décidé par un citoyen, dans le domaine de la santé. […] quiconque peut te dire, surtout un parent […] 'Moi je sais ce qui est mieux pour mon gamin'. Alors moi ça j'y crois pas, c'est-à-dire que je crois fortement dans le *training*, je crois fortement dans la culture et dans la professionnalisation »[2688].

Dans un court article sur les différentes formes de la démocratie technique, le sociologue des sciences Michel Callon a distingué trois modèles[2689]. Le premier est le *modèle de l'instruction publique*, dans lequel les scientifiques sont selon lui censés instruire le public de manière compréhensible : « Non seulement les scientifiques doivent tout apprendre au public mais, de plus, ils ne peuvent rien apprendre de lui »[2690] ; « la science est-elle autonome, mais pas indépendante : elle se plie au contrôle des pouvoirs publics »[2691]. La vision de Colizza semble s'inscrire dans ce cadre :

> « je crois sans doute au fait que la science portera des progrès ultérieurs dans le domaine de notre défense contre les épidémies. Selon moi il y a un rôle important sur lequel nous devons travailler encore beaucoup : ces organismes de santé publique et leurs interactions et leur *reach out* […] nous devons travailler beaucoup sur l'aspect communication, les dernières épidémies ont été des catastrophes d'un point de vue communicationnel et cela a quand même des implications à long terme […] sur la perception des personnes, sur leur confiance dans les institutions sanitaires, et si ça s'associe à une méfiance générale dans les institutions gouvernementales, ça devient une catastrophe pour la gestion »[2692].

Revenons maintenant aux géographes de la *communauté de la coconstruction autogestionnaire*, afin de tisser une comparaison heuristique avec ce qu'on discute ici. Si le deuxième modèle de Callon prend le nom de *débat public* (incarné par exemple par les conférences citoyennes) et que le troisième fait référence à la *coproduction des savoirs* (incarné par exemple par les associations de malades qui intègrent des savoirs à la médecine officielle), le dispositif ComMod s'inscrit dans le deuxième modèle. Banos marque ultérieurement la différence en proposant des outils de surveillance épidémique alternatifs aux outils centralisateurs des épidémiologistes computationnels. Pour lui cette structure centralisatrice devrait avoir un pendant horizontal et participatif. Critique des « bêtises énormes » qui auraient été faites par les

[2688] *Ibid.*
[2689] Callon, M., « Des différentes formes de démocratie technique », *Annales des Mines*, janvier 1998, pp. 63-73.
[2690] *Ibid.*, p. 64.
[2691] *Ibid.*, p. 65.
[2692] Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.

gouvernements dans les dernières années en matière d'acquisition de « stocks massifs » de vaccins pour des épidémies souvent surestimées, le chercheur dit travailler à un modèle épidémiologique ascendant pour faire de contrepoids au mode de fonctionnement actuel qu'il juge descendant :

> « En même temps pour moi ça devrait aussi y avoir un parallèle systématique avec le côté participatif, parce que faire une campagne de vaccination c'est facile sur le papier, quand on dit ça tout le monde voit à peu près ce que c'est. Or il se trouve que c'est un processus extrêmement compliqué pour lequel on n'a pas aujourd'hui absolument de certitudes et on continue à faire des bêtises énormes comme l'investissement dans des stocks massifs qui servent à rien. Enfin il y a beaucoup d'aberrations et donc simplement se focaliser sur la partie descendante, en partant du principe que tout ça ce sont des processus centralisateurs pour moi c'est pas suffisant. […] Notre rapport à l'épidémie en est radicalement différent, donc nous par exemple on a construit un modèle qu'on veut transformer en modèle participatif »[2693].

Une première raison de cette différence d'*imaginaires sociotechniques* peut résider dans la *culture épistémique* de chacun : ceux et celles ayant un parcours de physique peuvent avoir une tendance à soutenir des positions plus centralisatrices et descendantes, tandis que la vision plus horizontale, ascendante et participative de certains géographes résiderait dans leur ancrage dans les SHS. Une deuxième raison en revanche réside dans le fonctionnement actuel des institutions de santé publique, qui sont structurées de manière centralisées.

Onto-épistémologie

Nous avons vu que GLEaM a permis à ses concepteurs d'anticiper que « [d]ans le 83% des cas le pic [de contagiosité de H1N1] tombait dans [la semaine prévue par la simulation] »[2694]. Les épidémiologistes computationnelles, de par leur formation physique, mathématicienne et informaticienne, ont tendance à être *structuralistes* et à voir dans les règles du modèle numérique les mêmes règles de fonctionnement du système réel simulé. La métaphore bio-computationnelle dont il était question plus haut se révèle être donc une affirmation métaphysique. En essence, pour les représentants de ce régime, le monde est un réseau computationnel qui suit les règles de la physique statistique. C'est pour cela que la simulation peut, à leurs yeux, si bien prédire et anticiper.

[2693] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2694] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.

Dans le cas de l'épidémiologie computationnelle, la prédiction est défini comme épistémologiquement capable de deviner la concrétisation de certains événements futurs et à la fois politiquement à même de déjouer ces futurs. On peut ici faire appel au concept de *contre-performativité* tel que défini par MacKenzie[2695]. Dans son article *The big, bad wolf and the rational market*, le sociologue distingue la performativité générale de celle particulière : la première est celle qui détermine toute action humaine culturelle et non-naturelle ; la deuxième suit Austin et est plus spécifique, se référant aux choses qui adviennent parce qu'on dit qu'elles adviennent. Ensuite, MacKenzie introduit la notion de *contre-performativité* pour se référer à ces actes qui se veulent performatifs et qui finissent par produire l'effet contraire. On peut voir l'activité de *prémédiation* des épidémiologistes comme un quatrième type de performativité, qui veut déjouer l'événement qu'elle annonce (en cela, ceci se rapproche de la notion de *catastrophisme éclairé* introduite par Jean-Pierre Dupuy[2696]). Prenons pour exemple la visualisation des résultats d'un modèle au bénéfice de l'*outreach*. La fig. 38, tiré d'un article de 2005 de l'équipe ayant développé EpiSimS, illustre l'évolution dans le temps de seulement deux scénarios, l'un où il n'y aurait aucune intervention de la part du gouvernement ni de la population, l'autre où la vaccination, la quarantaine et la réaction de la population ont lieu. Le but de telle visualisation, dans un article de vulgarisation, n'est pas tant d'instiller l'importance de la réaction individuelle dans la conscience collective que dans l'esprit des décideurs politiques. Dans la légende accompagnant cette image, on lit que le choix précoce de la part des citoyens et des citoyennes de rester à la maison a été le premier facteur d'impact pour la limitation des dégâts :

> « In both scenarios shown, smallpox is released at a university in central Portland, but the attack is not detected until victims start experiencing symptoms 10 days later. The left-hand images show no public health response as a baseline. In the right-hand images, infected and exposed individuals are targeted for vaccination and quarantine. Results from a series of such simulations (*bottom*) show that people withdrawing to their homes early in an outbreak makes the biggest difference in death toll. The speed of official response, regardless of the strategy chosen, proved to be the second most important factor »[2697].

On y lit aussi que le fait de rester à la maison, qui est une solution tellement décisive qu'elle peut permettre de se passer de toute autre intervention, est la conséquence des

[2695] MacKenzie, D., « The big, bad wolf and the rational market : portfolio insurance, the 1987 crash and the performativity of economics », *Economy and Society*, 2004, vol. 33, n. 3, pp. 303-334.
[2696] Dupuy, J.-P., *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*, Paris, Seuil, 2004.
[2697] Barrett, C.L., Eubank, S.G. & Smith, J.P., « If smallpox strikes Portland », *Scientific American*, 2005, vol. 3, n. 292, p. 60.

instructions des autorités, lesquelles ont plus de chance de réduire les impacts négatifs s'ils s'y prennent tôt :

> « Simulations allowed people to withdraw to their homes because they felt ill or were following officials' instructions. Withdrawal could be 'early', before anyone became contagious, or 'never', meaning people continued moving about unless they died. 'Late' withdrawal, 24 hours after becoming contagious, was less effective than early withdrawal, which prevented an epidemic without other intervention »[2698].

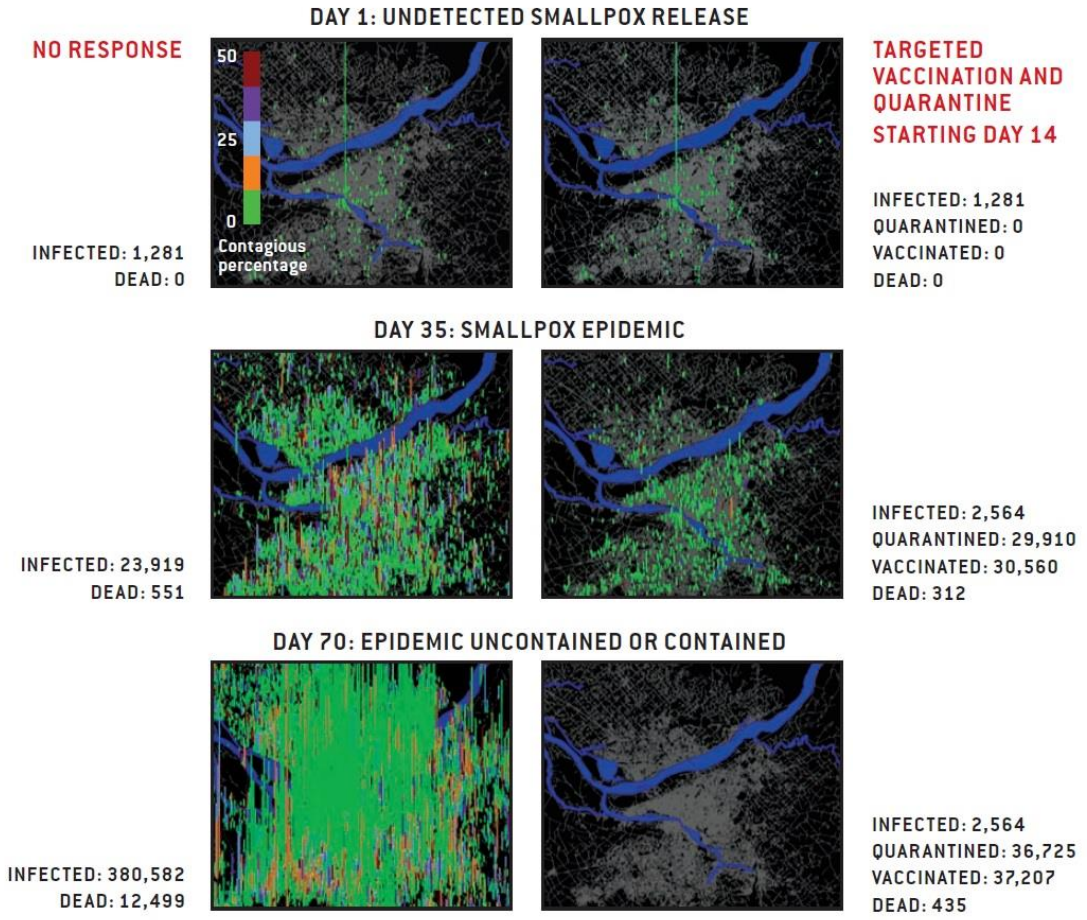


Figure 38. Évolution de deux scénarios épidémiologiques, l'un où il n'y aurait aucune intervention de la part du gouvernement ni de la population, l'autre où la vaccination, la quarantaine et la réaction de la population ont un effet positif. Image tirée de Barrett, C.L., Eubank, S.G. & Smith, J.P., « If smallpox strikes Portland », Scientific American, 2005, vol. 3, n. 292, p. 60

Les ambitions institutionnelles des épidémiologistes computationnels illustrent bien la confiance que ceux-ci ont dans leurs simulations. On se limitera ici à rajouter un exemple ultérieur, qui est pour l'instant formulé sous la forme d'augure. Vespignani souhaite, dans le futur, coupler les modèles de diffusion épidémique aux modèles phylogénétiques des organismes pathogènes – la complexité de ces simulations serait telle que le chercheur espère dans les ordinateurs quantiques afin de traiter ces

[2698] *Ibid.*

« montagnes d'opérations »[2699]. Autrement dit, dans son discours et dans celui de la plupart de ses collègues, ce qui fait défaut aujourd'hui pour réaliser la surveillance épidémique en temps réel n'est pas tant la potentialité théorique, mais la puissance de calcul ainsi que les infrastructures sociotechniques adéquates.

Régime d'énonciation des futurs

Cette *communauté d'anticipation*, comme les deux précédentes, articule de manière originale trois *régimes du futur* au sens de Chateauraynaud : l'anticipation, la prévision et la prospective. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le travail des épidémiologistes computationnels n'est pas afférent au régime de l'urgence, parce que dans l'urgence c'est normalement déjà trop tard pour anticiper. Donc, à la lumière de ce qui précède, on peut dire que dans la *communauté de la prémédiation centralisée*

- la modalisation du temps est à cheval entre celle de l'anticipation, parce qu'il s'agit d'un temps accéléré, et celle de la prospective, car ce temps reste ouvert sur une pluralité de possibilités différentes ;
- la logique d'action est à la fois celle de l'anticipation, qui agit (ou souhaite agir) sur l'amont d'un processus en cours en se basant sur des précédents, celle de la prévision, qui implique un espace de calcul pour la mise en place d'une planification, et celle de la prospective, car il s'agit de scénariser le futur ;
- le prototype est le travail de scénarisation des effets et des temporalités d'une pandémie pour préparer des stratégies de vaccination adéquates.

Une remarque de Chateauraynaud correspond bien à la catégorie qu'on est en train de discuter ici : « la fréquente oscillation entre urgence et anticipation, conduit les prévisionnistes à produire des cycles de révisions de plus en plus courts, créant une sorte d'obsolescence programmée de leurs propres pronostics »[2700]. De ce problème sont bien conscients nos interviewés, qui en effet mettent l'accent sur la nécessité de collecter beaucoup de données, de le faire de manière standardisée et avec précision, et de les insérer en flux continu dans leurs modèles, pour doter la politique et le public d'une « épidémiologie computationnelle météorologique ».

Rapport au futur

Comme dans les deux cas concernant les géographes, chez les épidémiologistes aussi il s'agit d'anticiper les conséquences de certains choix, mais ces choix sont une réaction à un événement qui vient du futur à notre encontre. Le rapport au temps des épidémiologistes implique une flèche qui va du futur vers nous, le but étant d'infléchir cette flèche pour éviter le pire. L'enjeu est d'intervenir sur un malheur qui se dirige vers nous de manière inévitable, mais que nous pouvons limiter, voire empêcher. Cela

[2699] Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
[2700] Chateauraynaud, F., « Regard analytique sur l'activité visionnaire », *op. cit.*, p. 304.

se fait par une activité importante de scénarisation sur laquelle il vaut la peine de s'attarder quelque peu.
Comme l'explique LANL 4, les scénarios servent prioritairement à établir des interventions de « vaccination ciblée », en repérant des populations qui seraient plus susceptibles de contracter la maladie :

> « [LANL 1 and I] were using EpiSimS for targeted vaccination. So we were trying to understand if you could pick a certain population of the group that's perhaps more susceptible to the disease than other populations. So for example [with the] flu […] kids and older adults […] are much more likely to be more seriously ill from the flu than people that are our age. And as a result […] if you have a limited supply of vaccine, especially at the beginning of the year when it starts to ramp up, you might want to target those age groups before anybody else »[2701].

Une autre forme de scénario dépend de la force de frappe de la maladie : mettre au point un scénario où l'épidémie est faible, un autre où elle est moyenne et un autre encore où elle est forte permet d'envisager différentes stratégies de vaccination (ciblée, aléatoire, générale). Ainsi, comme le dit Vespignani, la scénarisation des épidémiologistes computationnels se distingue de la prédiction proprement dite, parce que si la deuxième intervient lorsque les scientifiques ont suffisamment de confiance dans leur modèle ainsi que suffisamment de données en temps réel, la première sert à explorer des possibilités dont on ne possède pas suffisamment de données :

> « La prédiction est quand tu as des modèles qui sont hautement prédictifs, c'est-à-dire qu'à ce moment-là tu connais très bien tes *confidence [intervals]* […] Ensuite il y a la partie plus scénario et ça c'est les cas où tu n'as pas du tout la donnée et tu ne pourras jamais la trouver. C'est-à-dire que quand je te dis ce qui va se passer si je commence les vaccinations le 18 juin, celui-là est un scénario parce que je ne sais pas du tout si les vaccinations commenceront le 18 juin. Là tu devras faire des choix qui appartiennent au futur : j'imagine que le 20% de la population soit disposé à se vacciner, mais tu ne sais pas si ça sera le nombre [effectif de vaccinés] et donc ce que tu fais c'est de créer des scénarios souvent très, très variables, qui peuvent cependant t'informer sur ce qu'il vaut mieux faire, car tu dis 'Mon dieu, regardez que si l'on ne vaccine pas au moins 50% des personnes, tout ça c'est inutile »[2702].

Une campagne de vaccination change évidemment l'état du système et crée des nouvelles configurations. Pour continuer à anticiper, il faudra des nouvelles données. Mais l'intervention étatique n'est pas le seul facteur de changement de l'état du

[2701] Entretien avec LANL 4, 29.09.16.
[2702] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.

système, car l'annonce même de l'arrivée d'une pandémie peut changer le comportement des populations et donc modifier l'évolution de la pandémie elle-même, en l'aggravant, en la ralentissant ou en la déplaçant. Comme le dit synthétiquement LANL 5 : « when you act on a weather forecast, you bring an umbrella, it doesn't change the weather forecast. The disease forecast, it's a self-feedback that changes the diseases forecast »[2703]. Vespignani le dit d'une autre manière : « le fait que l'homme soit dans le *loop* fait en sorte que le modèle lui-même soit partie du système [modélisé] »[2704]. Si les géographes de la *communauté de l'innovation libérale* ne pouvaient pas se permettre des anticipations à très court terme, les épidémiologistes peuvent et doivent s'y essayer. Au début d'une épidémie, les modélisateurs lancent une simulation pour couvrir plusieurs mois. Lorsqu'on commence à voir des réactions de la part de la population et/ou des organismes publics, la « fenêtre temporelle » se raccourcit :

> « Si demain il y a [une épidémie] et que les gens ne vont plus au travail, ne vont plus à l'école, je vais devoir introduire ça dans le modèle […] et ça raccourcit la fenêtre temporelle des prédictions, peut-être ça a un sens que de faire la prédiction pour les quatre semaines qui viennent, mais après tu dois les refaire et en théorie il faudrait […] les refaire tous les jours, si on avait les données »[2705].

En d'autres mots, en épidémiologie computationnelle en raison de la finesse des simulations le futur résulte plus ou moins extensible en fonction des comportements sociaux et politiques, aussi bien qu'en fonction des données disponibles sur ces derniers.

Vision des systèmes complexes

La vision de la société des géographes de la première communauté est plutôt plate, le pouvoir de changement étant diffus – surtout dans le monde entrepreneurial et technologique – mais fortement limité par les contraintes physico-géographiques. Chez ComMod, le pouvoir revient à des individus conscients de leur place dans le système et dotés de l'*agency* qui peut leur permettre de changer la donne. Dans le cas des épidémiologistes computationnels, la vision du pouvoir est verticale et la société n'est donc pas plate, mais composée de quelques grands nœuds. Si dans les deux régimes concernant les géographes le mouvement du changement est plus ou moins ascendant, dans la *communauté de la prémédiation centralisée* il est nettement descendant. Selon Banos, ceci est lié non seulement à la formation des épidémiologistes computationnels, mais aussi aux modèles développés et aux échelles de pertinence qui sont adressées :

[2703] Entretien avec LANL 5, 29.09.16.
[2704] Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
[2705] *Ibid.*

> « Il faut voir aussi que les modèles de Vittoria [Colizza] sont des modèles planétaires et qui sont très orientés vers la santé publique au sens le plus centralisateur possible comme les campagnes de vaccination etc. Là il y a beaucoup de choses qui sont poussées par les États. C'est impossible de ne pas adresser, de traiter le problème à ce niveau-là, puisqu'on est vraiment sur des investissements massifs »[2706].

Si nous voulions renommer cette communauté en fonction de la vision des systèmes complexes qu'elle porte, on pourrait l'appeler *communauté des systèmes complexes asymétriques*.

Conclusion

Le numérique est souvent vu comme le véhicule technique par excellence d'un monde capitaliste qui se répand sur le globe à la conquête de tous les marchés possibles. Schiller a écrit que les réseaux digitaux sont le meilleur allié de la globalisation menée par les entreprises transnationales : « As *permissive technologies* that are built to facilitate centralized control over far-flung corporate operations, networks permit transnational companies to elevate footloose profit hunger into what they seek to dignify with the term *globalization* »[2707]. Nous soutenons que des telles lectures souffrent de déterminisme technique, en oubliant les usages différents et contraires à cette logique que les scientifiques font du digital. Les sciences computationnelles en général, et les SSC en particulier, reposent sur une structure sociale, sur une infrastructure matérielle et sur une ontologie opérationnelle en réseaux. Cela implique-t-il l'impossibilité pour les scientifiques d'inscrire les sciences computationnelles qu'ils pratiquent dans des structures, des infrastructures et des ontologies différentes ? Ce chapitre a montré que ce n'est pas le cas, qu'il n'y a pas qu'une seule *forme épistémique* entre SSC et (néo)libéralisme[2708].

À partir d'une idée courante, selon laquelle les SSC sont systématiquement associées à la vision néolibérale de la société, comme étant plate, imprédictible, auto-organisée (ou spontanée) et compétitive, nous avons montré que plusieurs visions des systèmes complexes existent à côté de ou en opposition à la vision hayékenne. Nous pouvons, à cet égard, énumérer *a minima* trois visions. Une version effectivement (néo)libérale des systèmes complexes, qui voit chaque agent comme dépourvu de prise sur le système global. Ensuite il y a une version issue de la théorie des réseaux, où les systèmes peuvent être régulés par l'activité de certains grands *hubs* comme l'État. Et enfin, une vision qui intègre les précédentes mais qui restitue aux petits nœuds une

[2706] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2707] Schiller, D., *Digital Capitalism*, *op. cit.*, p. 208.
[2708] Karsenti, B. & Lemieux, C., *Socialisme et sociologie*, Paris, Editions de l'EHESS, 2017, pp. 62-63.

conscience et un pouvoir de changement du système global, pouvoir qui est tout aussi grand que celui possédé par les grands *hubs*, à condition que plein de petits agents se mettent à collaborer et à travailler à l'unisson.

Les *imaginaires sociotechniques* de nos interviewés sont strictement connectés à leurs visions des systèmes complexes et se manifestent à travers un certain type de *travail transépistémique*. Si la première communauté de géographes fonde sa vision de la société sur l'innovation comme étant le véritable moteur du changement sociétal et qu'il exerce son travail de conseil dans une optique d'expertise, la deuxième communauté de géographes repose sur les valeurs de la participation, de la soutenabilité environnementale et de la justice sociale, et exerce son travail de conseil à travers des *forums hybrides* dont le mode de fonctionnement est réfléchi pour faire en sorte d'assurer le plus grand pluralisme. Les épidémiologistes constituent une communauté à part, fondée sur un *imaginaire sociotechnique* composé de cinq piliers : le serment d'Hippocrate ; l'optimisation des systèmes économique et étatique en vigueur ; le paradigme de la *prémédiation*, tel qu'il a été décrit par Grusin ; la vision d'un État central fort ; et un rapport avec les citoyens et les citoyennes s'inscrivant dans le *modèle de l'instruction publique* décrit par Callon.

Nous avons donc étudié la production de savoirs et de techniques de la part de nos scientifiques comme étant en même temps une activité politique. Les *communautés d'anticipation* que nous avons identifiées à partir de ce terrain, et les visions des systèmes complexes qui y sont associées, ne sont pourtant pas étanches. Un individu peut être porteur de plusieurs visions des systèmes complexes, selon le contexte ou au même moment. Par exemple, le géographe Arnaud Banos, dans ses contributions à l'épidémiologie computationnelle, suit une logique participative, mais il intègre dans sa perspective la présence de *hubs* importants comme l'État. Il voit donc son dispositif comme étant complémentaire au système de santé publique centralisé sur lesquels reposent les gouvernements. En même temps, ce chercheur a également collaboré dans sa carrière avec des grandes entreprises pour faciliter la gestion centralisée de plusieurs problématiques liées aux transports en commun.

En ce qui concerne le rapport au futur, les géographes sont en général impliqués dans l'infléchissement d'une flèche du temps qui va du présent vers le futur, alors que les épidémiologistes tâchent de multiplier les futurs possibles pour se préparer à chacun d'entre eux et pour ainsi infléchir la flèche qui du futur vient vers le présent. Les épidémiologistes travaillant dans l'urgence, le court terme les engage à une précision plus grande ; en revanche les géographes travaillent sur le long terme, pour prévoir la conséquence de certains choix politiques. Si l'épidémiologie confectionne des scénarios prémédiés et que les géographes de la *communauté de l'innovation libérale* proposent des scénarios calculés, on pourrait dire que la géographie de la *coconstruction autogestionnaire* performe des scénarios miroir.

En matière d'aide à la décision, la géographie quantitative montre une attitude plus prudente. Tout en croyant, comme l'épidémiologie computationnelle, au pouvoir anticipateur des simulations – ce qui est lié à leur vision *structuraliste*. Cette position épistémico-métaphysique semble avoir comme conséquence le fait d'accroitre la confiance que ces scientifiques ont à l'égard de leurs productions numériques. En effet, si leurs simulations ont un pouvoir explicatif et même prédictif, pourquoi ne devraient-ils pas se tourner vers les pouvoirs publics et privés pour leur offrir un support prospectif ? Si la nature fonctionne en réseau, les simulations par réseaux ne peuvent que décrire correctement les systèmes réels ciblés. Cela est à mettre certainement en connexion avec les *cultures épistémiques* hégémoniques dans ces deux spécialités, c'est-à-dire celle physique et celle informatique. Les savoirs physiques et informatiques priment non seulement chez les géographes et les épidémiologistes qui ont un parcours de physicien ou d'informaticien, mais aussi chez les géographes et les biologistes de formation.

Les points en commun entre les deux spécialités qui constituent la matière de ce chapitre, ainsi que leur inscription stratégique dans les SSC, expliquent notre choix d'étudier ensemble ces deux spécialités, en les prenant comme un objet d'étude partiellement cohérent mais suffisamment différencié pour que la comparaison entre les différents groupes observés résulte heuristique. Il faut mentionner, en conclusion, que bien d'autres groupes sociaux inscrits dans les SSC auraient pu être examinés, ce qui n'aurait pas manqué de faire ressortir d'autres *communautés d'anticipation*. Il suffit de penser aux représentants du courant de la vie artificielle, inscrits dans l'onto-épistémologie *vitaliste*, qui sont très actifs dans un type d'*engagement épistémique* penché sur l'entrepreneuriat et le *consulting* aux entreprises. Ou aux éconophysiciens du SFI qui ont lancé des compagnies de *high frequency trading*. Mais tout cela constitue peut-être l'objet de travaux à venir.

Conclusion générale

À travers l'histoire des sciences de la complexité, nous avons cherché à saisir les formes de justification et les modes d'organisation d'un domaine des savoirs généralement connu de manière superficielle, et en tous cas peu étudié par les SHS. Il nous a ainsi fallu analyser, et parfois déconstruire – en les dénaturalisant ou en les complexifiant – un certain nombre de récits sur les sciences computationnelles au sens large.

Partant du général pour aller vers le particulier, l'argument de la thèse a d'abord cherché à s'affranchir de trois formes de déterminisme technique, liées à la littérature sur l'usage de l'ordinateur dans les sciences. Nous avons ensuite ouvert une série de questionnements spécifiques à propos des sciences de la complexité. Dans cette conclusion, nous nous livrons à l'exercice inverse. À partir d'un résumé des acquis de la thèse, on se propose d'en montrer les retombées plus vastes.

Des SSC aux sciences computationnelles

Le domaine des SSC ne forme qu'une galaxie parmi d'autres dans l'univers des théories de la complexité (chapitre 1). Il désigne une communauté auto-définie de chercheurs et de chercheuses de diverses disciplines rassemblés autour du concept de système complexe. Ce terme est polysémique et flexible, pouvant être approprié tant par des physiciens ou des biologistes que par des géographes ou des archéologues ; il est en outre utilisé par sa référence à des outils de recherche dédiés à l'analyse d'ensembles intégrés de nombreux éléments (hétérogènes ou pas) en interaction réciproque, pouvant conduire (ou pas) à des propriétés macroscopiques dites émergentes. Communauté lâche composée d'individus aux identités multiples, le monde des sciences de la complexité gagne à être défini comme une *plateforme méta-disciplinaire*, à savoir comme un espace épistémique, social et institutionnel sur lequel des scientifiques, marginaux ou désireux d'innover dans leur propre discipline, s'appuient pour trouver refuge, légitimité, inspiration ou encore chercher des alliés (chapitre 8). Axée de manière explicite et militante sur l'interdisciplinarité, cette communauté est intéressante pour examiner les formes que peut prendre le travail scientifique interdisciplinaire (chapitre 9) et pour décrire les usages planifiés de l'architecture institutionnelle dans l'encouragement de ce type de travail (chapitre 10).

Mais l'interdisciplinarité ne se donne pas sans efforts, sans conflits, sans stratégies. Même au sein d'un domaine auto-défini comme interdisciplinaire, faisant de ce trait son identité principale, l'*interculturalité épistémique* n'a pas lieu immédiatement et naturellement dès qu'on a l'intention de la pratiquer ; elle n'est pas un fait direct et inéluctable de l'emploi de l'ordinateur. Nous avons donc préféré parler d'*ingénierie de l'interdisciplinarité* pour nommer les pratiques, les discours et les stratégies que les

entrepreneurs scientifiques des systèmes complexes ont mis en place pour faire naître et pour entretenir les collaborations entre disciplines diverses. L'histoire du SFI (chapitre 3) ainsi que celles du CREA (chapitre 5) et de la fondation du domaine des SSC en France (chapitre 6) montrent les politiques, les contingences, les tensions et les conflits qui se trouvent derrière l'essor, l'affirmation et le déploiement d'un domaine aujourd'hui connu pour sa démarche interdisciplinaire et computationnelle. Le chapitre 2 a clairement montré le projet épistémique des SSC de part et d'autre de l'Atlantique en ce qui concerne la hiérarchie épistémique et métaphysique qu'elles souhaitent instaurer entre d'une part les sciences formelles et formalisatrices – informatique, physique et mathématiques – et d'autre part les sciences non ou moins formelles, souvent considérées comme des cibles à formaliser – sciences de la vie et SHS. Contrairement aux récits répandus sur les sciences numériques, nous avons soutenu que l'ordinateur n'est pas un facteur nécessaire et suffisant à la mise en place de collaborations interdisciplinaires fructueuses et symétriques. En son nom peuvent être menées des batailles chargées de violence symbolique ; des individus ou des groupes sociaux peuvent le brandir pour en enrôler d'autres dans un type de travail de recherche défini comme interdisciplinaire, à des fins d'*emprise* sur des domaines considérés – par les enrôleurs et les enrôlés – comme peu scientifiques, « mous », « *messy* » ou « à dépoussiérer ». En réaction à cela, contre le monde qui va avec l'ordinateur peuvent être érigées des résistances ; et en son absence peuvent tout aussi bien être réalisées des expériences qualifiées d'interdisciplinaires.

D'autre part, l'analyse des régimes de l'administration de la preuve à l'œuvre au sein des sciences de la complexité (chapitre 11), aussi bien que la classification idéal-typique des *positions onto-épistémologiques* des praticiens des systèmes complexes, montrent que les savoirs computationnels ne représentent pas une nouveauté absolue pour la réflexion épistémologique. Dans les sciences ancrées sur les outils numériques, les chercheurs et les chercheuses mobilisent des formes de l'administration de la preuve déjà mises au point dans d'autres disciplines. Plus qu'une nouvelle épistémologie, nous avons soutenu qu'il s'agit d'une réflexion plus poussée sur les ontologies que les scientifiques ont du cosmos et sur la manière dont celles-ci s'articulent aux conditions de validité de la connaissance régissant l'usage de la simulation par ordinateur. Ce dernier ne donne pas automatiquement vie à des savoirs, lesquels nécessitent une toute autre réflexion philosophique, mais représente un instrument autour duquel les pratiques disciplinaires et les visions du monde des scientifiques se réinvestissent et se reconfigurent.

Selon Francis Chateauraynaud[2709], qui condense une conviction profonde des STS[2710], il y a trois niveaux logiques autour desquels se fait ou se défait l'activité argumentative des « acteurs » : le plan ontologique (liste des entités pertinentes), le plan épistémique

[2709] Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces*, *op. cit.*, p. 104.
[2710] Pour ne donner qu'un exemple : Woolgar, S. & Lezaun, J., « The wrong bin bag », *op. cit.*

(modes de connaissance) et le plan axiologique (valeurs et principes)[2711]. S'il existe bien d'autres volets importants – tels que l'économique, l'esthétique, etc. –, force est de constater que, dans ses travaux sur les *cultures épistémiques*, Karin Knorr-Cetina investit plus les pratiques scientifiques et les métaphysiques des savants que leurs visions axiologiques ou idéologiques. Dans le chapitre 15, à travers les notions d'*engagement épistémique* et de *communauté d'anticipation*, nous avons souhaité apporter une contribution sur cet aspect. Prendre en compte un certain nombre de visions des systèmes complexes telles qu'elles sont articulées à des visions du rôle de la science, de la société et de la politique nous a permis de contester l'idée selon laquelle le digital fait inévitablement advenir des postures néolibérales, darwiniennes et plates de la société. Dans le secteur particulier des sciences computationnelles que nous avons examiné, on a vu que les *engagements épistémiques* peuvent certes prendre une forme proche de la vision hayékenne ou reaganienne, mais aussi des formes qui s'en éloignent ou qui s'y opposent.

Le déterminisme technique est un réductionnisme. C'est un mode discursif qui simplifie le réel, qui le découpe artificiellement, qui réduit des phénomènes enchevêtrés à des processus mono-causaux et unidirectionnels. Le chapitre 14, consacré à une critique de la raison computationnelle, n'est pas le seul endroit où on privilégie les *tâches techniquement secondes* (i.e. critiquer) par rapport aux *tâches techniquement premières* (i.e. décrire). Dans cette conclusion nous voulons revenir sur la posture sociologique adoptée à travers ces pages et défendre une *vision onto-épistémologique* du social qui se distingue du déterminisme technique des analystes, des entrepreneurs scientifiques, des journalistes ou des politiques et à la fois des visions *structuralistes* propres aux *communautés d'anticipation de l'innovation libérale* et *de la prémédiation centralisée*.

Notre onto-épistémologie combine notamment déterminisme social et ouverture des futurs, car les individus nous semblent être dotés d'un libre arbitre *limité* par les contraintes du monde. Et celui-ci est un monde, comme le dit Dominique Pestre, « où tout n'est pas possible, un monde certes mouvant mais non fluide et au contraire charpenté – où tout ne se reconfigure pas à volonté et en permanence »[2712]. C'est un monde, comme le dit Chateauraynaud, composé de « champs de force » où les « forces »[2713] peuvent confirmer ou reconfigurer les équilibres dans lesquels les individus se trouvent ou bien infléchir les trajectoires dominantes dans un champ

[2711] Prenons le cas de CRISPR-CAS9 issu des biotechnologies comme exemple paradigmatique : déterminer les techniques, les méthodologies et les approches pour l'étudier (épistémologie) implique et dépend de la vision qu'on en a (ontologie) ; ensuite, l'ensemble des deux niveaux précédents est déterminante pour établir le genre de régulation qu'on en fera (idéologie/politique).

[2712] Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *op. cit.*, p. 645.

[2713] « Une force est ce qui produit un changement d'état dans le monde et un champ de forces se caractérise par la mise en rapport de capacités différentes de transformation des états de choses. Créer un rapport de forces, c'est être en mesure de faire plier, reculer, disparaître ce qui fait obstacle à l'action ou à la reconfiguration d'un milieu, d'une activité et ou d'un dispositif » : Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces*, *op. cit.*, p. 22.

donné. « Les traités de sociologie contemporaine, écrit-il dans son dernier ouvrage publié avec Josquin Debaz, parlent d'exigence de symétrie. Ici, c'est la pratique de l'enquête qui nourrit la quête de symétrie. Tout n'est pas pour autant équivalent à tout »[2714]. Selon la vision défendue dans ce travail, le monde n'est pas plat ; il est plutôt « vallonné, structuré, toujours-déjà contraignant », comme l'écrit Pestre, raison pour laquelle « [l]es 'acteurs' ne sont pas égaux face à la capacité de faire ou défaire les mondes »[2715]. Et, pour retourner à Chateauraynaud et Debaz, « [r]endre irréversible, c'est rendre impossible ou, pour le moins, très coûteuse toute marche arrière ou stratégie alternative. […] l'irréversible n'engage le destin des êtres que par et pour l'action et, se faisant, défait tout déterminisme simple »[2716].

S'il y a un message tout à la fois épistémique, métaphysique et politique dans cette thèse, c'est celui d'une mise en garde générale contre les excès réductionnistes d'une partie des SSC et des sciences computationnelles, ainsi que d'une partie des discours de leurs soutiens et commentateurs. D'un côté, les mécanismes magnétiques, gravitationnels ou réticulaires invoqués pour comprendre, expliquer et prédire les systèmes complexes naturels et humains peuvent se révéler pertinents et utiles, mais d'un autre côté, il faut veiller à ce que les caractéristiques matérielles du monde et socioculturelles des humains ne soient pas évacuées, minimisées, invisibilisées ou réduites à des métaphores opérationnelles d'ordre mécanique et computationnel. Que cela concerne l'écologie, la géographie ou l'épidémiologie, au sein des SSC ce sont les méthodes, les infrastructures et les axiologies des physiciens, des mathématiciens et des informaticiens qui finissent par s'imposer et par assurer la compréhension et l'anticipation des écosystèmes, des villes et des épidémies. Cette thèse n'est pas l'histoire d'une hégémonie socio-techno-métaphysique d'un groupe sur un autre, mais entend contribuer à une limitation de cette hégémonie. Les comptes-rendus ou les prophéties enthousiastes de la révolution technologique qui vient abondent. Le Web 3.0 et la révolution industrielle numérique, l'avènement du *cloud* ou l'essor de l'Intelligence Artificielle et de la robotique pour tous et toutes, le mode de vie de la Silicon Valley et le transhumanisme ne manquent pas de chantres pour les louer[2717]. Il

[2714] Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible*, *op. cit.*, p. 26.
[2715] Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *op. cit.*, p. 639.
[2716] Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible*, *op. cit.*, p. 599.
[2717] « Yet too often the agenda for discussing the past, present and future of technology is set by the promoters of new technologies. When we are told about technology from on high we are made to think about novelty and the future. For many decades now the term 'technology' has been closely linked with *invention* (the creation of a new idea) and *innovation* (the first use of a new idea). Talk about technology centres on research and development, patents and the early stages of use, for which the term *diffusion* is used. The timelines of technological history, and they abound, are based on dates of invention and innovation. The most significant twentieth-century technologies are often reduced to the following : flight (1903), nuclear power (1945), contraception (1955), and the internet (1965). We are told that change is taking place at an ever accelerating pace, and that the new is increasingly powerful. The world, the gurus insist, is entering a new historical epoch as a result of technology. In the new economy, in new times, in our post-industrial and postmodern condition, knowledge of the present and past is supposedly ever less relevant. Inventors, even in these post-modern times, are 'ahead of their time', while societies suffer from the grip of the past, resulting in a supposed slowness to

est alors nécessaire de leur opposer un discours argumenté, réfléchi, scientifique, philosophique, ouvrant sur des alternatives, un discours (ou plutôt une pluralité de discours) qui puisse(nt) donner prise à tous ceux et celles qui ne souhaitent pas s'embarquer dans la *siliconisation du monde*[2718] ou qui ne se reconnaissent pas dans l'« immatérialité » des cultures numériques[2719], un discours en somme pour quiconque ne veut pas se laisser happer par la « raison algorithmique »[2720] envahissante et totalitaire. Un regard distancié et antiréductionniste des pratiques scientifiques computationnelles et du monde digital en général est nécessaire aussi pour ceux et celles qui veulent bénéficier de ses potentialités, sans se faire aspirer dans des visions post-humaines aliénantes et cybernétiques. Si les métaphysiques retrouvent un statut de métaphores, si les épistémologies peuvent de nouveau être discutées à pied d'égalité entre représentants de disciplines différentes, si les ontologies des objets d'étude sont renégociées collectivement, si, au total, les collaborations interdisciplinaires se font de manière pluraliste et symétrique, alors les outils numériques formeront des ressources pour tous et toutes plutôt que des menaces.

Limites et ouvertures de la thèse

Le matériau que nous avons collecté est multiforme. En tant que tel il permettait d'aborder d'autres thématiques. Elles sont restées au dehors ou sur les bords pour des raisons de pertinence ou d'espace. Le volet esthétique sur le rôle de la visualisation dans le travail de laboratoire ou dans l'effort institutionnel, économique, politique et vulgarisateur des entrepreneurs scientifiques aurait pu par exemple être traité. Un chapitre sur l'apport des SSC aux sciences économiques et un autre sur l'usage des outils des SSC dans le monde des entreprises auraient pu également être réalisés. Bref, au-delà de la déconstruction du déterminisme technologique propre aux discours de certains groupes sociaux, l'analyse de la mouvance de la « complexité » peut constituer une porte d'entrée ou un lieu d'observation privilégié pour de nombreuses problématiques liées à l'étude des technosciences contemporaines. Or, malgré la richesse de ces matériaux et les potentialités qu'ils offrent, de nombreux points aveugles et pistes non-parcourues peuvent être mentionnés, à partir de l'ethnographie du processus de modélisation computationnelle lorsqu'il se fait à l'interface de scientifiques issus de domaines différents. L'observation approfondie du travail interdisciplinaire numérique aurait pu en effet clarifier les détails des tensions et des transferts, des négociations et des partages qui sont à l'œuvre dans ces interfaces. Tout aussi intéressant aurait été l'analyse fine des collaborations *transépistémiques* entre les

---

adapt to new technology » : Edgerton, D., *The Shock of the Old. Technology and Global History since 1900*, Londres, Profile Books, 2008, p. IX.

[2718] Sadin, É., *La siliconisation du monde. L'irrésistible expansion du libéralisme numérique*, Le Kremlin Bicêtre, L'Echappée éditions, 2016.

[2719] Pias, C., « On the epistemology of computer simulation », *op. cit.*, pp. 52-53.

[2720] Sadin, É., *La vie algorithmique. Critique de la raison numérique*, Le Kremlin Bicêtre, L'Echappée éditions, 2015.

membres des *communautés d'anticipation* et les pouvoirs publics et les entreprises. Les *engagements épistémiques* auraient alors été observés à l'œuvre, en pratique, en acte. Mais il n'y a pas que le « qualitatif ». Sur le front du « quantitatif », on aurait aimé par exemple cartographier, par l'un ou l'autre des outils numériques aujourd'hui à disposition en SHS, l'étendue des SSC sur le plan international, à la fois en traçant les publications scientifiques qui s'en réclament et les instituts de la complexité disséminés dans le monde. De même, on aurait aimé quantifier statistiquement les différents idéaux-types que nous avons construits et proposés au cours de ce travail, par exemple à travers l'administration de courts questionnaires en ligne à envoyer à une platée plus vaste que celle à laquelle nous avons eu accès par entretien direct. Enfin on aurait aimé pouvoir appuyer notre classification en sept *traditions* des théories de la complexité sur une analyse scientométrique par « réseaux ».
Mais, toutes ces tâches ne demandent qu'à être reprises, la thèse ayant ouvert une pluralité de trajectoires possibles, à la mesure de la densité des éléments qu'elle nous a conduit à brasser.

Annexe 1 – Grille de questions des entretiens

Cette grille a été construite au début de notre thèse, en 2014. Elle a été mise à jour plusieurs fois. Les questions contenues ici n'ont pas été posées à tous les interlocuteurs dans leur ensemble. Le sujet principal de discussion variait selon la personne rencontrée et en fonction de l'état d'avancement de notre recherche. Si d'une part ces questions peuvent faire comprendre comment on en est arrivé à nos résultats et à nos thèses principaux, il ne faut d'autre part pas oublier que de nombreuses questions spécifiques, qui ne sont pas listées ici, ont été demandées à chaque interlocuteur en fonction de son parcours individuel.

Biographie et complexité

- Je voudrais commencer par votre parcours scientifique et institutionnel. / *I'd like to start with your scientific and institutional pathway.*
    - Comment vous vous êtes rapproché de la complexité ? / *How did you get interested into complexity ?*
    - Quelles insatisfactions vous ont motivés à fonder/rattacher à un institut de la complexité ? / *What insatisfactions motivated you to found/join a complexity institute ?*
    - Quelle est la définition que vous donneriez de la complexité et/ou des systèmes complexes ? / *What's the definition that you would give of complexity and/or complex systems ?*
    - Existe-t-elle une science de la complexité ou il y en a plusieurs? / *Is there a complexity science or a plurality of it ?*
    - Quelles théories et outils ont eu le plus de succès et dans quel domaine et avec quels organismes ? / *What theories and tools have had the most of success and in what domain and with which organisms ?*
    - La complexité est pour vous un changement de paradigme ? Si oui, devrait-il s'étendre à tous les scientifiques ? / *According to you complexity is a paradigmatic shift ? If so, do you think it should become dominant in all sciences ?*
    - Quels sont les outils conceptuels les plus communs au sein de l'Institut ? / *What are the more common conceptual instruments at the Institute ?*
    - Qui ont été vos inspirateurs pour l'étude des systèmes complexes ? / *Who are your inspirations for the study of complex systems ?*
    - Où préférez-vous publier ? / Where do you prefer to publish ?

Pratiques scientifiques et épistémologie

- Qu'est-ce que vous faites quand il y a une divergence entre modèles et données ? *What do you do when there is a divergence between models and data ?*
    - Comment jugez-vous l'erreur dans vos pratiques scientifiques ? Quand est-ce que vous vous dites, voici une erreur ? / *How do you detect error in your scientific practices ? When is it that you say, oh there is an error ?*
    - Comment vous cherchez l'erreur ? Et comment vous essayez de le corriger ? Comment vous essayez de transformer votre expérience pour qu'elle donne des résultats sensés ? / H*ow do you seek for the error ? And how do you try to correct it ? How do you transform your experience so that it can give meaningful results ?*
    - Quel est pour vous un bon instrument, quand est-ce que vous considérez que ça marche ? Quels moyens de contrôle vous appliquez à vos expériences ? / *What is for you a good instrument, when do you consider that it works ? What means of control do you apply to your experiences ?*
    - Qu'est-ce que vous faites quand il y a une divergence entre résultats de la simulation et données ? / *What do you do when you find a divergence between simulation results and data ?*
    - Est-ce que dans vos recherches, les données pour être interprétées ont besoin d'un modèle ? / *In your research, do data need a model to be interpreted ?*
    - Quelle est la différence entre la modélisation et la simulation ? *What's the difference between modeling and simulation ?*
    - Quelles sont les phases de votre travail de recherche ? / *What are the stages of your research work ?*
- Quel est votre langage spécifique : tuning, tweaking, calibrage, paramétrisation, evaluation du modèle, scenario, quoi de plus ? / *What is your typical language : tuning, tweaking, calibration, parameterization, model evaluation, scenario, what else ?*
- Rencontrez-vous le problème de la sous-détermination des modèles par les observations ? / *Do you encounter the problem of nonuniqueness or equifinality ?*
- Si oui, comment vous le résolvez ? Sur la base de quoi vous choisissez un modèle plutôt qu'un autre ? / *If yes, how do you resolve it ? On the basis of what do you choose a model instead of another ?*
- Quel est votre rapport avec le monde « réel » en termes de contrôle de vos modèles ? / *What is your relationship with the real world in terms of control of your models?*

- Quel rapport avez-vous avec vos objets d'étude ? / *What relationship do you have with your study objects ?*
- Combien d'arbitraire y a-t-il dans votre théorie et dans votre approche ? *How much arbitrariety is there in your theory and approach ?*
- Vous vous sentez plus galiléen ou constructiviste ? / *Do you feel more Galileian or more constructivist ?*
- Que pensez-vous du problème du réductionnisme ? / *What do you think about the problem of reductionism ?*
- Est-ce le monde contemporain qui détermine l'approche réseau ou est-ce cette dernière qui vous fait voir le monde d'une certaine manière ? / *Is it contemporary world which determines the network approach or is it the latter that makes you see the world in a certain way ?*

L'Institut de la complexité

- Quels sont les succès majeurs de votre institut selon vous ? / *What are the major achievements of your institute, according to you?*
- Qui sont vos détracteurs et pourquoi ? Qu'est-ce que vous leur répondez ? / *Who are your detractors and why ? What do you respond to them ?*
  - Quels arguments et quelles preuves avez-vous formulés pour convaincre d'autres scientifiques à vous soutenir et suivre ? / *What arguments and what proofs did you formulate to convince other scientists to support and join you ?*
  - Quels arguments et quelles preuves avez-vous formulés pour convaincre les partenaires à vous fournir des financements ? Quel est leur intérêt et contrepartie dans la collaboration avec vous ? / *What arguments and what proofs have you formulated to convince the donors to support you ? What is their interest in the collaboration with you ? What do they get in return ?*
- Quelles règles académiques et sociales lient les chercheurs dans les collaborations et dans la publication des résultats ? / *What academic and social rules connect the researchers in their collaborations and in the publication of their results ?*
  - Comment sont-ils organisés les projets ? Comment le chef est désigné ? Comment on repartit les tâches ? / *How are the projects organized ? How is it designed the head of the project ? How is the work divided ?*
  - Est-ce que les résultats ou les savoir-faire sont toujours et pacifiquement partagés ou il y a une compétition entre les collègues ? Et s'il y a de la compétition, à quel niveau agit-elle ? / *Are the results and the know-hows always peacefully shared or is there a competition between colleagues ? And if there is a competition, at what level is it active ?*

    - Quel est le rôle et l'impact de l'institut au niveau international ? / *What do you think is the impact of the institute internationally ?*
- Rapports avec industrie, management et politique ? / *Any collaboration with industry, management and politics ?*

Histoire de la discipline

- Quels outils théoriques ont été développés au sein des sciences des systèmes complexes ? / *What theoretical tools have been developed within complex systems sciences ?*
- En d'autres mots, quelle est la spécificité du domaine de la complexité ? / *In other words, what is the specificity of the complex systems domain?*
- Quel est le rapport du domaine des systèmes complexes avec le chaos ? / *What is the relationship of complex systems domain with the chaos ?*
- Qu'est-ce que deviennent les docteurs et postdoctorants après leur séjour chez vous ? Trouvent-ils un poste plus ou moins facilement ? Dans des centres disciplinaires ou interdisciplinaires ? / *What do your doctors and postdoctorants become after staying at your institute ? Do they find a job more or less easily ? In disciplinary or interdisciplinary centers and departments ?*

Idéologie, métaphysique, politique, entreprise

- Quels sont les intérêts de vos financeurs dans ce que vous faites ? / *What are your funders' interests in what you do ?*
- Quel type de financeurs avez-vous ? / *What kind of funders do you have ?*
- Collaborez-vous avec les pouvoirs publics et les décideurs politiques ? Pourquoi et dans quel cadre ? / *Do you collaborate with public powers and policy makers ? Why and within which frame ?*
- Quelle est votre vision de la science et de son rôle dans la société ? / *What is your vision of science and of its role into society ?*
- Do human beings have free will according to you ? / *Est-ce que d'après vous les humains sont dotés de libre arbitre ?*
- Quel est le poids de la politique et de l'économie dans les affaires humaines ? / *What is the importance of politics and of economy in human affairs ?*
- Quelle place a l'innovation selon vous dans l'Histoire ? / *What is the role of innovation in History according to you ?*

Annexe II – Géographie quantitative et épidémiologie computationnelle : spécialités, prosopographie et théories

La géographie quantitative

Dans cette section, on commence par retracer à grands traits l'histoire de la géographie quantitative, ensuite on présente la prosopographie de nos interviewés, puis leurs théories et modèles, enfin leurs visions de leur spécialité.

Éléments historiques

En citant les géographes, Varenne définit leur discipline comme une « science carrefour »[2721]. Même si elle est le plus souvent définie comme *la science de l'organisation de l'espace et des pratiques spatiales humaines*, elle se distingue en deux grands courants : la *géographie humaine*, qui se classe parmi les sciences sociales, et la *géographie physique*, qui trouve ses sources dans les sciences naturelles comme la géologie ou l'hydrologie. Le courant qui constitue l'objet d'étude de Varenne et de nous-mêmes ici se trouve à cheval entre les deux : « [q]uand elle cherche principalement à mettre au jour des théories formalisées, des lois ou des modèles, qu'elle soit physique ou humaine, on peut qualifier la géographie de 'géographie quantitative et théorique' »[2722]. Le philosophe et historien repère le « tournant quantitativiste » de la géographie humaine dans les années 1950 et 1960. Il situe ses débuts historiques dans les articles de trois géographes nord-américains, Fred Schaefer qui plaidait pour une géographie nomothétique et positive[2723], Ian Burton qui invoquait l'usage de modèles explicatifs probabilistes[2724] et Edward Ackerman qui proposait une vision normative de la géographie, inspirée de la recherche opérationnelle, unissant les méthodes théoriques et quantitatives au travail de terrain[2725]. Pour Varenne il faut interpréter ces textes comme une réaction au tournant mathématique et quantitativiste que les autres sciences sociales avaient pris dans le deuxième après-guerre. Le volume collectif dirigé par les géographes britanniques Richard Chorley et Peter Haggett en 1967[2726] est repéré par Varenne comme un autre travail fondateur, faisant appel à un « tournant radicalement *géométrique* et

[2721] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.*, p. 17.
[2722] *Ibid.*, p. 23.
[2723] Schaefer, F.K., « Exceptionalism in Geography : A Methodological Examination », *Annals of the Association of American Geographers*, 1953, vol. 43, n. 3, pp. 226-249.
[2724] Burton, I., « The quantitative revolution and theoretical geography », *The Canadian Geographer*, 1963, vol. VII, n. 4, pp. 151-162.
[2725] Ackerman, E.A., « Where is a Research Frontier ? », *Annals of the Association of American Geographers* 1963, vol. 53, pp. 429-440.
[2726] Chroley, R.J. & Haggett, P. (ed.), *Models in Geography*, Londres, Methuen & Co Ltd., 1967.

topologique des objets de la géographie »[2727]. Le géographe Alan Wilson, lui aussi britannique, est également important, pour avoir souligné le rôle de l'ordinateur[2728], pour avoir fourni un premier regard rétrospectif sur son courant et pour avoir introduit les méthodes de la topologie de René Thom dans sa discipline[2729]. Le canadien William Bunge considérait la carte comme étant essentiellement mathématique et donc analysable rigoureusement à travers la géométrie et la théorie des graphes[2730]. Le britannique Brian Berry est, quant à lui, l'introducteur d'une matrice d'interactions spatiales statistiques de nature territoriale et commerciale[2731]. Le suédois Torsten Hägerstrand se fait remarquer par son usage de l'ordinateur et en particulier des simulations Monte Carlo[2732]. Puis, Peter Allen[2733] et Michael Batty en Angleterre, Denise Pumain[2734] et Lena Sanders en France, ainsi que Geoffrey West et Luis Bettencourt aux États-Unis, appartiennent à la deuxième génération de géographes quantitativistes qui, outre la référence à leurs prédécesseurs, tirent profit de la littérature sur l'auto-organisation et sur les systèmes complexes.

Globalement ce courant de la géographie a trouvé, tout au long de son histoire, son inspiration en des domaines des sciences naturelles, notamment la physique, souvent liés aux concepts de système, de complexité et de réseau. La thermodynamique des systèmes ouverts, la systémique de von Bertalanffy, la théorie des graphes, la physique sociale de George Zipf et de John Q. Stewart (parmi d'autres), la théorie des catastrophes de Thom, les fractales de Mandelbrot, la synergétique de Hermann Haken, les structures dissipatives d'Ilya Prigogine, des pans des statistiques et de l'économie, puis plus récemment le courant des SSC, ont été parmi les principales inspirations théoriques et méthodologiques de la géographie quantitative, d'origine nord-américaine, anglaise et française.

Prosopographie de nos interviewés

Les géographes quantitativistes que nous avons interviewés se situent à Santa Fe, à Paris, à Rouen et à Grenoble.

Geoffrey West est un physicien théorique originaire d'Angleterre qui, après des études à l'Université d'Oxford et de Stanford, a rejoint le LANL pour travailler sur des thématiques liées à la physique des particules. Son arrivée au SFI au milieu des années

[2727] Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines*, *op. cit.*, p. 173.

[2728] Wilson, A.G., « Theoretical Geography : Some Speculation », *Transactions of the Institute of British Geographers*, 1972, n. 57, pp. 31-44.

[2729] Wilson, A.G., *Catastrophe theory and bifurcation : application to urban and regional systems*, Berkeley, University of California Press, 1981.

[2730] Bunge, W., *Theoretical Geography*, Lund, Lunds Studies in Geography, Series C, 1966.

[2731] Berry, B.J.L., *The Nature of Change in Geographical Ideas*, DeKalb, Northern Illinois University Press, 1978.

[2732] Hägerstrand, T., *Innovation Diffusion as a Spatial Process*, Chicago, The University of Chicago Press, 1967.

[2733] Allen, P.M., *Cities and Regions as Self-Organizing Systems*, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.

[2734] Pour lire l'horizon de rétrospection particulier de Denise Pumain, voir Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *op. cit.*

1990 se fait en raison de son intérêt pour les lois d'échelles dans les organismes vivants, sur lesquelles il publiera, avec les écologues Jim Brown et Brian Enquist, des articles sur l'allométrie et sur les régularités des structures métaboliques des organismes vivants. Au début des années 2000, West change encore de sujet de recherche et se penche sur l'étude quantitative des villes. Il a été président du SFI de 2005 à 2009.

Dans son travail de recherche sur les villes, West a été accompagné par Luis Bettencourt, physicien d'origine portugaise une trentaine d'années plus jeune que lui. Après des études en physique à l'Institut Polytechnique de Lisbonne et un doctorat en physique théorique à l'Imperial College de Londres, Bettencourt a réalisé des postdoctorats à l'Institut de Physique Théorique d'Heidelberg, au LANL et au MIT, lieu où il a acté sa transition vers les SSC, avant d'avoir un poste à Los Alamos et une position de professeur externe au SFI. En 2011 le SFI devient sa seule institution de rattachement. Six ans plus tard, Bettencourt est parti à l'Université de Chicago, notamment au Mansueto Institute for Urban Innovation en tant que Pritzker Director.

En France, Denise Pumain est la chef de file d'une école de géographie quantitativiste inspirée des SSC. Géographe de formation à l'ENS, elle a été active depuis le début de sa carrière dans la recherche de formes de modélisation mathématique et computationnelle des phénomènes géographiques, en contribuant au développement de ce domaine au niveau international et en formant plusieurs doctorants en France. En 1971 elle participa à une école de formation en mathématiques et statistiques pour géographes, tandis qu'entre 1980 et 1982 elle participa à des conférences sur l'entropie et les systèmes dynamiques, se rapprochant des écoles de Haken et Prigogine. De 1992 à 1996, Pumain a dirigé la thèse d'un informaticien issu de l'école de Jacques Ferber (expert des systèmes multi-agents) grâce auquel se fera la première simulation par MBA de Géographie-Cités. Au début des années 2000, quand Paul Bourgine, Michel Morvan, Jeffrey Johnson et Ralph Dum s'activent, avec d'autres, pour le lancement des SSC au niveau européen et français, Pumain devient une protagoniste importante de cette mouvance. Elle obtiendra aussi des financements européens pour collaborer avec West et Bettencourt à l'étude quantitative des villes.

Arnaud Banos, comme Pumain, a un parcours de géographe classique, ayant appris à modéliser de manière autodidacte. Après une licence et une maîtrise en géographie à l'Université de Pau obtenues dans la première moitié des années 1990 et suite à un postdoctorat en 2002-2003, Banos devient maître de conférences à l'Université de Pau, pour ensuite rejoindre le CNRS en 2006. Il dirige aujourd'hui l'UMR Géographie-Cités et a dirigé l'ISC-PIF de 2011 à 2013. Son adhésion à la géographie quantitative et aux SSC s'est donc faite en dehors des circuits de Pumain. Banos relate avoir découvert par hasard une série de livres du courant quantitatif anglo-saxon en géographie, à l'époque méconnu en France. Pendant sa thèse, menée en CIFRE au sein

de la SNCF, le géographe a appris à programmer en XLisp-Stat, puis plus tard à coder des MBA, outils qui sont devenus centraux dans ses recherches.
Un parcours de géographe est aussi celui d'Elise Beck, laquelle est toutefois moins engagée que Banos dans la programmation MBA et dans les SSC. Après une année de biologie, Beck se réoriente et choisit d'entreprendre le chemin de la géographie à l'Université de Strasbourg. Après deux maîtrises en géosciences et en géographie menées en France et au Canada, elle a commencé à travailler sur les risques sismiques et technologiques qu'elle a pu aborder de manière interdisciplinaire toujours à l'Université de Strasbourg pendant sa thèse. À la fin de son doctorat, en 2006, elle relate avoir rencontré Banos qui l'a introduite dans le Réseau thématique de modélisation multi-agents appliquée aux phénomènes spatialisés (MAPS) et aux SSC. Après avoir essayé de coder, Beck a renoncé à entreprendre ce chemin, préférant collaborer avec des modélisateurs par rapport auxquels elle fait fonction de « thématicienne ».
Clémentine Cottineau, chercheuse au CNRS depuis 2017, s'intéresse aux mathématiques et aux fractales à l'époque du lycée, où elle commence le russe. Elle s'inscrit finalement en géographie, attirée par la cartographie, ainsi qu'en économie, en parallèle de sa licence en géographie. Pour le mémoire de master dans ce dernier domaine, elle souhaite travailler à des applications des fractales à l'urbanisme, mais elle est redirigée par sa directrice Pumain vers l'étude d'une ville en Russie. Cottineau entamera ensuite une thèse, toujours sous la direction de Pumain, dans le but de modéliser un système de deux mille villes russes, entreprise dans laquelle elle sera accompagnée par les informaticiens de l'ISC-PIF, notamment par Paul Chapron, alors postdoctorant.
Un intérêt pour l'économie est nourri aussi par Antonio Ignazzi, docteur d'origine italienne, qui a suivi de 2003 à 2007 une licence d'Économie internationale à l'Université de Gêne, puis une maîtrise d'Économie et systèmes complexes à l'Université de Modène et Reggio Emilia de 2008 à 2010. Dans le cadre de sa thèse, effectuée entre 2011 et 2015 sous la direction de Pumain à Géographie-Cités, Ignazzi a travaillé à des modélisations statistiques du développement démographique et économique du Brésil sur plusieurs décennies. Depuis 2016, il est *data analyst* auprès d'Araxxe, une société de services de communication.
Si les chercheurs et les chercheuses précédents ont un curriculum humaniste et se sont intéressés aux sciences dures et à la modélisation dans le cours de leurs études, Sébastien Rey a parcouru le chemin inverse. Diplômé d'un IUT en informatique au tout début des années 2000 à Bayonne, ce chercheur a ensuite entamé une licence professionnelle sur le Web et les multimédias toujours à Bayonne, puis une première année de master en informatique à Pau. Las de la maîtrise en informatique, qui nécessitait de fortes connaissances en mathématiques, Rey s'inscrit en première année de licence de géographie à l'Université de Pau, puis en deuxième année à la Sorbonne,

mais ne termine pas le cursus. Il s'inscrit alors en Master 2 Carthagéo à la Sorbonne, où il y rencontre l'informaticien Thomas Louail, qui le porte à faire un premier stage à Géographie-Cités et ensuite une thèse sous la direction de Pumain.
Un parcours semblable, des sciences naturelles aux SHS quantitativistes, est celui de Pierre Fosset. Diplômé en 2011 du titre d'ingénieur, génie civil et environnement à l'École Nationale Supérieure d'Ingénieur de Limoges, il a travaillé un an en tant qu'ingénieur d'étude pour l'armée sur la gestion des déchets radioactifs de 2012 à 2013. Il a ensuite passé un an comme ingénieur d'étude au CNRS de 2014 à 2015 pour contribuer au développement d'un MBA de la ville de Grenoble, dans le contexte du projet ANR Modélisation Intra-urbaine des Rythmes quOtidiens (MIRO), auquel a participé la géographe Elise Beck depuis les débuts de l'initiative. Depuis 2016, Fosset est ingénieur de mise en service chez Suez.
Thomas Louail est rattaché à Géographie-Cités. Après un master en informatique à l'Université Pierre et Marie Curie, avec un parcours en intelligence artificielle et décision achevé en 2005, il entame une thèse en informatique à l'Université d'Evry sur la morphogenèse urbaine en Europe et aux États-Unis. Il obtient le diplôme de docteur en 2010. À la suite d'une série de postdoctorats en France et en Espagne, il devient chargé de recherches au CNRS en 2016. Il découvre les SSC pendant le master, à travers le modélisateur expert de MBA Alexis Drogoul. Louail est en outre à l'origine du collectif Eighties[2735], qui regroupe des jeunes chercheurs et chercheuses autour de l'étude des villes par les méthodes issues des *Big Data* et des SSC.
Après un baccalauréat scientifique, Paul Chapron s'inscrit, de par sa fascination pour les jeux vidéos et les effets spéciaux cinématographiques, dans l'école d'ingénieurs Télécom Nancy, où il découvre et apprend l'informatique pour la première fois. Lors d'un séminaire de deuxième année, il découvre les MBA, qu'il a pu étudier dans le contexte de quelques stages de licence. Une fois obtenu le diplôme d'ingénieur, il s'inscrit en master où il peut approfondir l'outil des systèmes multi-agents. Lors de sa thèse à l'Université de Toulouse, Chapron a développé des MBA pour modéliser des organisations sociales, en se basant sur la sociologie de l'action organisée de Michel Crozier et Erhard Friedberg. Pendant la thèse il découvre ainsi à la fois les SSC et les sciences sociales. S'ensuit un premier postdoctorat à Géographie-Cité dans le cadre du projet européen GeoDiverCity, pour accompagner les modélisations de Clémentine Cottineau, ensuite un autre postdoctorat à l'ISC-PIF aussi bien qu'une collaboration entrepreneuriale avec Romain Reuillon et Mathieu Leclaire autour de la plateforme OpenMOLE.
Romain Reuillon a commencé à coder pendant son enfance. Originaire de Clermont-Ferrand, il y obtient un DUT en 2001, ensuite un diplôme d'ingénieur en informatique et enfin un diplôme doctoral dans le même domaine. Son laboratoire de rattachement pendant la thèse est le Laboratoire d'Informatique des Systèmes Complexes, dirigé par

[2735] Site officiel du collectif : http://eighties-cities.github.io.

Guillaume Deffuant. En 2008, ce dernier, membre actif de la communauté des SSC françaises, dirige Reuillon vers David Chavalarias pour obtenir un postdoctorat au CREA et à l'ISC-PIF. À la fin d'une série de postdoctorats dans cette dernière institution, Reuillon est embauché en tant qu'ingénieur d'étude au CNRS rattaché à mi-temps à Géographie-Cités et à mi-temps à l'ISC-PIF. Il affirme avoir des connaissances de géographie suffisantes pour interagir avec ses collègues géographes, mais sa culture dans le domaine s'est faite par la modélisation plus que par la lecture de manuels ou d'articles scientifiques sur la discipline, notamment dans le cadre du projet européen GeoDiverCity.

Mathieu Leclaire, originaire de Château Thierry, a obtenu un diplôme d'ingénieur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen en 2004. Intéressé par les mathématiques et la physique, Leclaire découvre l'informatique pendant la licence. Après un postdoctorat dans un laboratoire de l'INRA à Thiverval-Grignon et un à l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales de Châtillon, Leclaire répond à un appel d'offre de postdoctorat lancé par l'ISC-PIF en 2009. Il est aujourd'hui ingénieur de recherche du CNRS, en étant affecté comme Reuillon à mi-temps à Géographie-Cités et à mi-temps à l'ISC-PIF. Il ne se définit pas géographe et affirme avoir formé ses connaissances en géographie dans le processus de collaboration avec les chercheurs et les chercheuses du laboratoire dirigé par Banos, notamment dans le cadre du projet européen GeoDiverCity.

Michael Batty est un géographe quantitativiste britannique. Il a obtenu un diplôme d'aménagement urbain et rural à l'Université de Manchester en 1966. Il a obtenu aussi un diplôme doctoral en 1984 à l'Université du pays de Galles à Cardiff sur des modèles de dynamique urbaine. Initialement professeur assistant d'aménagement urbain et rural à l'Université de Manchester en 1966, il a été ensuite enseignant et chercheur en géographie à l'Université de Reading dans le Berkshire, puis professeur d'aménagement urbain à l'Université du pays de Galles en 1979, puis encore directeur du National Center for Geographic Information and Analysis à l'Université de l'État de New York à Buffalo. Depuis 1995 il dirige le Center for Advanced Spatial Analysis (CASA) à l'University College de Londres. Depuis sa thèse, Batty est engagé dans l'emploi de techniques issues de la géométrie, de la physique et de l'informatique à la géographie, pour en faire une science pouvant diriger la décision politique.

De cette prosopographie émerge une distinction assez nette entre les géographes de formation et les informaticiens de formation. Les profils intermédiaires – tel un informaticien qui devient géographe ou qui maîtrise une certaine littérature des SHS ou alors un géographe qui devient autonome dans des modélisations numériques assez complexes – restent rares. Un autre clivage oppose le duo de Santa Fe marqué par un parcours de physicien et les équipes françaises et anglaises où des géographes de formation s'intéressent à différents outils issus des SSC au cours de leurs études. D'un

point de vue onto-épistémologique, la position *structuraliste* domine, même s'il existe quelques exemples de *dualistes*.

Théories et modèles produits par nos interviewés

Geoffrey West et Luis Bettencourt sont les promoteurs d'une « théorie unifiée du vivre urbain » : « the need is urgent for an integrated, quantitative, predictive, science-based understanding of the dynamics, growth and organization of cities »[2736]. Cela en raison de leur conviction que les villes manifestent des caractéristiques universelles et quantifiables, où la taille possède un rôle déterminant, tandis que l'histoire, la géographie et le design possèdent des « rôles secondaires »[2737]. Ces phénomènes sont, d'après ces chercheurs, exprimables dans des « 'lois' mathématiques simples »[2738]. Celles-ci sont typiquement des lois de puissance scalaires, mais aussi des lois statistiques ou des séries temporelles, qui montrent, selon Bettencourt et West, la présence systématique de deux régularités : des économies d'échelles en termes d'infrastructures et des rendements croissants dans la productivité socio-économique[2739]. En particulier, le premier point signifie que, si la population d'une ville double, les infrastructures augmenteront uniquement de 85%. Quant au deuxième point, cela signifie que les salaires, le PIB, les brevets, les institutions éducatives et de recherche, ainsi que les congestions dues au trafic automobile, les crimes et certaines maladies augmentent de 15% par rapport à la variation linéaire attendue.

Les recherches du groupe français, qui connaît les travaux des collègues du SFI avec qui Pumain a collaboré dans la deuxième moitié des années 2000, intègrent dans des MBA les formules mathématiques comme celles développées par West et Bettencourt ou comme celles provenant de la littérature de la géographie quantitative[2740]. Dédiées jusqu'ici au test des théories à travers la pratique du *backcasting*, ces modèles-simulations se basent sur une série de théories qui sont, entre autres, la loi de Zipf[2741], le modèle de Gibrat[2742], les lois d'échelles, ainsi que les modèles gravitaires[2743]. Une fois ces lois inscrites dans un code MBA et une fois les données insérées, le modèle-simulation est lancé sur la grille européenne à travers la plateforme OpenMOLE pour

[2736] Bettencourt, L. & West, G., « A unified theory of urban living », *Nature*, 2010, vol. 467, p. 912.
[2737] *Ibid.*
[2738] *Ibid.*
[2739] Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Strumsky, D. & West, G., « Urban Scaling and Its Deviations : Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities », *PLoS ONE*, 2010, vol. 5, n. 11, e13541.
[2740] Pumain, D. et al., « Multilevel comparison of large urban systems », *op. cit.*
[2741] La loi de Zipf décrit la fréquence des mots dans un texte, mais est appliquée en géographie pour décrire la taille et le nombre des villes dans chaque pays. Dans les deux cas, elle vise à montrer qu'il y a une régularité, le mot le plus courant d'un texte ou la ville la plus grande étant dix fois plsu fréquent ou plus grande que le/la dixième, cent fois plus fréquent ou plus grande que le/la centième, et ainsi de suite.
[2742] Le modèle de Gibrat prédit la forme statistique des hiérarchies urbaines et leur persistence dans le temps, en assumant que les villes grandissent de manière proportionnelle à leur taille. C'est une croissance exponentielle qui est variable sur le court terme, mais vérifiable sur le long terme.
[2743] Les modèles gravitaires s'inspirent de la loi de Newton pour formaliser le pouvoir d'attraction d'une ville par rapport à sa taille et à sa position sur son entourage urbain, les échanges entre deux villes étant d'autant plus importants que le poids des villes est grand et d'autant plus faibles qu'elles seront éloignées.

lancer des centaines de millions de simulations, qui servent aux chercheurs et aux chercheuses à explorer les paramètres manquants et à calibrer les interactions entre les différentes sous-parties mathématico-théoriques qui composent le modèle numérique[2744]. Plusieurs MBA ont été développés à Géographie-Cités dans la « famille » Simpop[2745], par exemple SimpopLocal[2746], EUROSIM[2747], MARIUS[2748] ou DARIUS[2749]. Leur objectif, abstraction faite des différences particulières, est de simuler comment un système structuré et hiérarchisé de villes émerge et évolue au fil du temps à partir de l'interaction entre ces villes.

Conception de leur spécialité selon nos interviewés

À la question sur la légitimité qu'il peut avoir aux yeux des géographes, Bettencourt répond que si « être géographe » signifie connaître la géographie, alors il est un géographe ; si par contre cela signifie avoir un doctorat en géographie et avoir travaillé dans un département inscrit dans cette discipline, alors il n'en est pas un[2750]. Après avoir affirmé que la géographie manque d'unité, Bettencourt soutient que, s'il devait trouver une qualification pour ce qu'il fait, il revendiquerait d'abord son appartenance au domaine des systèmes complexes et puis à celui qu'il appelle « science des villes ». Ce dernier commence selon lui à être suffisamment mature pour que les scientifiques puissent s'y identifier : « studies of cities becomes more mature, then you can say that that's what you do. And that's what I do »[2751]. Pour Bettencourt le champ de la géographie aux États-Unis est plus diversifié par rapport à son homologue européen. Son impression, issue de ses participations à l'American Association of Geographers, est que la direction que la discipline est en train de prendre aujourd'hui est celle de la quantification, de l'exploitation des *Big Data* et du GIS.

La situation en France est légèrement différente en termes théoriques et méthodologiques, mais, comme leurs collègues américains, les géographes quantitativistes français trouvent leur légitimité en priorité dans l'arène scientifique. Comme le dit Leclaire, la légitimité académique « renforce aussi [la] crédibilité [des scientifiques] à travailler » avec des entités non-académiques[2752]. Il n'empêche que le

[2744] Schmitt, C. et al., « Half a billion simulations », *op. cit.*

[2745] Pumain, D. & Sanders, L., 2013, « Theoretical principles in inter-urban simulation models : a comparison », *Environment and Planning A*, n. 45, pp. 2243-2260.

[2746] Rey-Coyrehourcq, S., *Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie*, 2015, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne ; Schmitt, C., *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet*, 2014, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne.

[2747] Sanders, L., Favaro, J.M., Glisse, B., Mathian, H. & Pumain, D., « Intelligence artificielle et agents collectives : le modèle Eurosim », *Cybergeo, European Journal of Geography*, 2007, n. 392, pp. 1-16.

[2748] Cottineau, C., *L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations*, 2014, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne.

[2749] Cottineau, C., « DARIUS Database. Harmonised Database of Cities in the Post-Soviet Space, 1840–2010 », *Figshare*, 2015, disponible en ligne : http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1108081.

[2750] Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.

[2751] *Ibid.*

[2752] Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.

travail transépistémique, notamment sous la forme de collaborations avec les mondes de l'entreprise et de l'administration, comme le dit Banos, « renforce la légitimité de la sous-discipline à la fois vis-à-vis de l'extérieur mais également en interne »[2753]. Toutefois, si le groupe de Denise Pumain se nourrit surtout de financements publics de recherche européens et nationaux en montrant une certaine prudence quant au travail de conseil, Banos se tourne surtout vers des entreprises, des *think tank* ou des administrations locales parce qu'il considère sa spécialité comme une discipline de terrain. Quant aux deux géographes du SFI, leur *travail transépistémique* est plus important, ce qui s'explique par une série de raisons : d'abord, la nature privée des financements privilégiés par l'institut auquel ils appartiennent ; puis le fait que la collaboration extra-académique leur permet d'accumuler du prestige et de la légitimité en tant qu'individus, certes, mais surtout en tant que représentants de l'institut dont ils défendent et portent la marque dans le domaine public ; et enfin le fait que ces collaborations avec ONG, *think tank*, mairies et décideurs politiques nationaux constituent autant de « terrains » pour tester leurs modèles que de sources de données pour en développer de nouveaux.

L'épidémiologie computationnelle

Comme dans la section précédente, commençons par retracer à grands traits l'histoire de l'épidémiologie computationnelle, pour présenter ensuite la prosopographie de nos interviewés, puis leurs théories et modèles, et enfin leurs visions de leur spécialité.

Éléments historiques

La biochimiste et historienne des sciences américaine Nancy Krieger définit l'épidémiologie comme un ensemble de théories qui se préoccupent de la santé publique, en mobilisant des connaissances de biologie, de sociologie, d'écologie, d'économie et de géographie, afin d'étudier la distribution des maladies[2754]. Dans son ouvrage à la fois théorique et historique *Epidemiology and the People's Health. Theory and Context*, elle retrace les origines de la discipline en les situant dans l'Europe du XVII^{ème} siècle, notamment dans les premiers travaux de statistiques sociales, même si Hippocrate et Galène avaient déjà avancé des théories étiologiques. Le terme « épidémiologie » (en grec : ce qui tombe sur le peuple) semble apparaître pour la première fois en 1802 dans une chronique des épidémies espagnoles écrite par Don Joaquín de Villalba[2755]. Vers 1830, l'épidémiologie est, selon Krieger, un

[2753] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
[2754] Krieger, N., *Epidemiology and the People's Health*, *op. cit.*, p. VII.
[2755] Villalba, J. de, *Epidemiologia Espanola, o historia cronologica de las pestes, contagios, epidemias y epizootias que han acaecido en Espana desde la venida de los Cartagineses hasta el ano 1801. Con noticia de algunas otras enfermedades de esta especie que han sufrido los Espanoles en otros reynos, y do los autores*

domaine de recherche reconnu par une communauté émergente[2756]. La chercheuse toutefois ne mentionne pas, dans son texte, les nouvelles méthodes computationnelles, qui ont commencé à paraître quelques années avant l'époque de la publication de son livre. Pour situer cette nouvelle spécialité, il est fort utile d'avoir une vision d'ensemble de la discipline épidémiologique, ce qui peut être fourni par un manuel du secteur, tel que le *Handbook of Epidemiology* édité par Wolfgang Ahrens et Iris Pigeot en 2014 (année de la deuxième édition)[2757].

L'épidémiologie se divise en deux grandes branches, il y a d'une part la branche « expérimentale » qui vise à évaluer les effets des interventions épidémiologiques sur une ou plusieurs populations données ; il y a d'autre part la branche « observationnelle » qui étudie des situations données, sans en changer ou contrôler les paramètres. La branche « observationnelle » peut être divisée à son tour en approche « explicative » et « descriptive », la première visant à collecter des données spécifiques pour tester des hypothèses et des théories à propos du fonctionnement de certaines maladies, la seconde collectant de manière routinière les données relatives à la santé des populations. Dans tous les cas, l'objectif ultime de l'épidémiologie est de promouvoir, protéger et restaurer la santé, car les épidémiologistes, comme les médecins, ont fait le serment d'Hippocrate. Malgré les tensions disciplinaires – les biométriciens affirment que l'épidémiologie est une branche de leur propre discipline, les médecins affirment la même chose –, le cadre commun de cette discipline reste le domaine de la santé publique (finalisée via la prévention et le traitement des maladies), qui peut être considéré à la fois comme une institution sociale, une discipline et un ensemble de pratiques. Selon les éditeurs du *Handbook of Epidemiology*, l'épidémiologie devrait être considérée comme une science multidisciplinaire, créant les prémisses d'une expertise de santé publique[2758].

En ce qui concerne l'épidémiologie computationnelle, et sa variante dite digitale[2759], les équipes qui l'ont lancée sont encore actives et le domaine est encore émergent. L'épidémiologie computationnelle existe depuis plus de dix ans, les bases ayant été

---

nacionales que han escrito sobre esta materia, asi en la peninsula como fuero de ella, Madrid, en la imprenta de Don Fermin Villapando, 1803.

[2756] Krieger, N., *Epidemiology and the People's Health*, *op. cit.*, p. 58.

[2757] Ahrens, W. & Pigeot, I. (ed.), *Handbook of Epidemiology*, New York, Heidelberg, Dordrecht & Londres, Springer, 2014, p. 5.

[2758] Krieger, N., *Epidemiology and the People's Health*, *op. cit.*, p. 10.

[2759] Nos interviewés distinguent entre l'épidémiologie computationnelle et celle digitale. Selon Paolotti, la première intègre des formules mathématiques provenant du courant statistique de la discipline, appelé *epidemic modeling*, avec la différence que ces formules mathématiques sont intégrées dans des simulations de vaste échelle sur des grilles de calcul. Quant à l'épidémiologie digitale, Cattuto explique que ce terme vise à mettre l'accent plus sur la source de données que sur les outils théoriques. Ce courant exploite des sources non-traditionnelles, telles que les traces et les métadonnées repérables sur Twitter, Facebook, Google ou Wikipedia. La référence concernant cette nouvelle spécialité est la suivante : Salathé, M., Bengtsson, L., Bodnar, T.J., Brewer, D.D., Brownstein, J.S., Buckee, C., Campbell, E.M., Cattuto, C., Khandelwal, S., Mabry, P.L. & Vespignani, A., « Digital Epidemiology », *PLoS Computational Biology*, 2012, vol. 8, n. 7.

fondées, parmi d'autres, par Vespignani et Romualdo Pastor-Satorras dès 2001[2760]. Les groupes de recherche dans ce domaine sont plus nombreux que ceux en épidémiologie digitale, lesquels coïncident en partie avec les premiers. On citera le groupe de John Brownstein au Boston Children's Hospital, celui de Marcel Salathè qui dirige le Digital Epidemiology Lab à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, celui d'Elizabeth Halloran au Center for Inference and Dynamics of Infectious Diseases de Seattle, celui de Dennis Chao au Fred Hutchinson Cancer Research Center de Bellevue (Washington), celui de John Edmunds à la London School of Hygiene & Tropical Medicine de Londres, celui de Neil Ferguson au Department of Infectious Disease Epidemiology de l'Imperial College de Londres, ainsi que celui de Dirk Brockmann au Robert Koch Institute de Berlin. Dans la plupart des cas, comme le dit Daniela Paolotti, « il s'agit typiquement de physiciens qui ont contaminé le *modeling* et l'épidémiologie »[2761].

Prosopographie de nos interviewés

Les équipes prises en examen se trouvent à Los Alamos, Boston, Paris et Turin. Trois d'entre elles – Boston, Paris et Turin – sont réunies autour d'une même plateforme : GLEaMviz, tandis que celle du LANL est connue pour EpiSimS. Toutes les équipes ne se limitent pas à ces plateformes, en utilisant chacune un éventail assez riche de méthodes computationnelles et statistiques différentes. On reviendra sur les modèles dans la sous-section suivante.

Puisque l'une des équipes que nous avons étudiées travaille dans un site national américain de recherche et de défense, à savoir le Los Alamos National Laboratory, nous avons dû anonymiser ses membres, en fournissant des informations quelque peu vagues sur leur compte et en remplaçant leurs noms par des codes.

Dans ce laboratoire, la mathématicienne de formation LANL 1 coordonne plusieurs projets de modélisation d'épidémies nationales ou internationales, surtout par MBA et par réseaux. Avec un parcours en mathématiques appliquées (licence, maîtrise et doctorat), elle s'est spécialisée en informatique pendant les études de troisième cycle. Après plusieurs postes temporaires au LANL, cette chercheuse y a été embauchée en tant que *project leader*.

LANL 2 vient de l'Iowa, où il a obtenu une licence en mathématiques et en sciences humaines. Son doctorat a porté sur les statistiques, mais son premier contact avec Los Alamos s'est fait pendant la licence grâce à un court stage. Spécialiste des séries temporelles bayésiennes, il est retourné au LANL en tant que postdoctorant pour travailler avec d'autres à une théorie mathématique pour accompagner l'usage des données Internet à des fins prédictives.

[2760] Pastor-Satorras, R. & Vespignani, A., « Epidemic dynamics and endemic states in complex networks », *Physical Review E*, 2001, vol. 63, n. 6.
[2761] Entretien avec Daniela Paolotti, 16.02.17.

LANL 3 a grandi dans l'État du Nouveau Mexique, il a une licence en informatique et, après une expérience dans le secteur privé, il obtient un poste de postdoctorant au LANL. Quelques temps après il est embauché par le laboratoire de manière stable. Si la moitié de son temps est dédiée à des thématiques informatiques, l'autre moitié est dédiée à l'épidémiologie computationnelle, pour laquelle il contribue à développer une théorie mathématique sur l'usage des données Internet à des fins prédictives avec LANL 2 et d'autres.
LANL 4 est texan et a obtenu une licence en informatique et en mathématiques. Pendant son doctorat, il a travaillé sur plusieurs problèmes différents, y compris une application en épidémiologie computationnelle qui l'a vu collaborer avec l'équipe de LANL 1. Il est resté à Los Alamos depuis, en enchaînant des contrats postdoctoraux pour travailler à des modélisations épidémiologiques, tel qu'EpiSimS.
LANL 5 est un biologiste diplômé dans une université du Maryland. Une fois terminé sa licence, il a été invité au LANL pour travailler sur un projet de biologie de laboratoire pendant un an. Au début intentionné à travailler dans le monde de l'industrie, il a opté pour faire un master en bioinformatique. Après son travail de paillasse, LANL 5 a commencé à travailler sur la simulation numérique d'une maladie du bétail. Inscrit en master d'épidémiologie, il travaille sur plusieurs projets de recherche liés à l'épidémiologie computationnelle et digitale.
LANL 6 a obtenu un diplôme de licence en mathématiques et en sciences humaines, dans une université de l'État de Washington, ensuite une maîtrise en mathématiques dans une autre université du même État. Après avoir travaillé trois ans en dehors de la recherche, elle a poursuivi des études de troisième cycle en mathématiques et modélisation informatique des écosystèmes. Après un postdoctorat au LANL, elle est embauchée en tant que *staff scientist*.
Si on abandonne le Nouveau-Mexique et on en vient à suivre les tentacules de GLEaM, les équipes liées à cette plateforme que nous avons étudiées sont celle d'Alessandro Vespignani à la Northeastern University de Boston, celle de Vittoria Colizza à l'INSERM de Paris et celle de Daniela Paolotti, Michele Tizzoni, Ciro Cattuto et d'autres à l'ISI de Turin.
Alessandro Vespignani a obtenu une licence en physique théorique en 1990 et une thèse en physique des matériaux en 1993 à l'Université La Sapienza de Rome. Intéressé tôt aux SSC, par le biais des fractales de Mandelbrot, par les travaux de Philip Anderson, puis par la théorie de la criticalité auto-organisée de Per Bak, Vespignani a conduit un postdoctorat à Yale et à Leiden, puis à l'International Center for Theoretical Physics de Trieste et à Paris-Sud, avant de devenir professeur à l'Indiana University en 2004 et ensuite à la Northeastern University en 2010. Depuis le début des années 2000, il a travaillé sur les réseaux complexes, avec des applications d'abord sur les virus d'Internet. De 2004 à 2011 il a été professeur d'informatique,

avant de se dédier à temps plein à l'épidémiologie computationnelle une fois arrivé à l'école de *Public Health* de l'université de Boston.

Vittoria Colizza a un parcours analogue à celui de Vespignani. Avec une licence en physique et une thèse en physique statistique à l'Université La Sapienza, elle a travaillé sur des applications de ces méthodes à la biologie lors de son postdoctorat à l'École Internationale Supérieure d'Études Avancées de Trieste de 2000 à 2004, où elle a rencontré Vespignani qui lui a proposé un autre postdoctorat à l'Indiana University. En 2008 elle rentre en Europe, notamment à l'Institute for Scientific Interchange de Turin, grâce à l'obtention d'une *Starting grant*, dans le cadre de l'European Research Council, qui lui a permis de créer sa propre équipe et son propre projet sur cinq ans. Depuis 2011 elle est chercheuse permanente à l'INSERM de Paris.

Ciro Cattuto a une licence en physique à l'Université de Pérouse et un doctorat en physique statistique à l'Université de Camerino. Après des expériences dans le secteur privé et en tant que postdoctorant dans plusieurs pays du monde, Cattuto rejoint l'ISI en 2007 en tant que chef de projets pour en devenir le directeur scientifique en 2013 et chef du laboratoire de *Data Science*. Ayant commencé à coder pendant son enfance, ce chercheur a toujours eu un fort penchant pour la simulation numérique : après avoir découvert les systèmes complexes en thèse et les travaux de Vespignani vers la moitié des années 2000, il arrive à l'épidémiologie digitale à travers l'étude des *sociopatterns*, les traces que les usagers laissent sur Internet, notamment dans les réseaux sociaux.

Daniela Paolotti a obtenu une licence et une spécialisation en physique de la matière en 2001 à l'Université de Pérouse et un doctorat en physique statistique en 2005 à l'Université de Camerino. C'est la rencontre avec Ciro Cattuto qui la fait tourner vers la physique statistique et les systèmes complexes. Après deux ans d'expérience dans un centre de recherche nationale et dans le secteur privé, elle arrive à l'ISI de Turin en 2007 en tant que postdoctorant pour être enfin embauchée en tant que chef de projets en 2013, dans le groupe d'épidémiologie computationnelle et santé publique de l'institut. Les techniques computationnelles développées en thèse la porteront à la bioinformatique et enfin à l'épidémiologie computationnelle et digitale.

Michele Tizzoni est lui aussi un physicien de formation. Originaire de Turin, il a obtenu un diplôme de trois ans en physique en 2005 et un master en physique statistique en 2007 à l'Université de sa ville natale. Un an après le début de sa thèse sur la matière condensée à l'École Polytechnique de la même ville, Tizzoni a commencé à chercher des alternatives à son sujet de thèse. Par le biais d'un ami de licence, il a découvert l'ISI et a pu faire une transition vers l'épidémiologie computationnelle avec la supervision de Colizza, tout en gardant le même directeur de thèse initial. Une fois obtenu le titre de docteur en 2012, il a conduit un postdoctorat au Centre for Disease Control de l'Université de la Colombie-Britannique à Vancouver en 2012-2013, puis un postdoctorat l'année suivante à l'ISI, avant d'y être embauché en tant que *Principal Researcher* en 2015.

Eugenio Valdano a une licence et une maîtrise en physique à l'Université de Turin, puis un doctorat en épidémiologie et santé publique à l'UPMC obtenu en 2015. Tant son doctorat que son premier postdoctorat ont eu lieu à l'Epi-Cx, laboratoire dirigé par Vittoria Colizza à l'INSERM. Valdano est actuellement postdoctorant à l'Université Rovira i Virgili à Tarragone, où il continue son travail de modélisation numérique des épidémies. Il a connu Vittoria Colizza et Ciro Cattuto lors d'un cours sur la physique de la complexité pendant sa licence à Turin.

Après une licence et une maîtrise en physique à l'Université La Sapienza de Rome, Davide Colombi a découvert la physique statistique et les systèmes complexes à travers Luciano Pietronero et Vittorio Loreto[2762] à la fin de la maîtrise en 2012. Après un an de bourse de recherche à l'ISI grâce à laquelle il a pu approfondir la littérature sur les réseaux complexes, il a ensuite entamé un doctorat à l'Université de Turin, toujours en étant sous la supervision de Colizza à l'ISI, sur les dynamiques d'opinions et sur la modélisation des épidémies animales. En 2018, il entame un postdoctorat à l'INSERM.

Corrado Gioannini a une licence en astrophysique obtenue en 1999 à l'Université de Turin. Après neuf ans dans le secteur privé en tant que développeur de logiciels et chef de projet, en 2009 il arrive à l'ISI, sur l'invitation de Cattuto et Paolotti, où il est depuis chef de projet. Son expertise est principalement informaticienne, Gioannini étant l'un des chercheurs les plus actifs dans la programmation, l'implémentation et la manutention de GLEaMviz.

De cette prosopographie émerge que les figures dominantes sont celle des physiciens, des mathématiciens et des informaticiens, l'informatique étant toutefois le domaine de travail de tous nos interviewés. Rares sont les biologistes de formation et absents sont les médecins ou les épidémiologistes de formation. À la différence des géographes quantitativistes français, chez les épidémiologistes computationnels on n'observe pas de clivages très nets en ce qui concerne la division du travail. S'il est vrai que GLEaMviz dispose d'une équipe d'informaticiens qui travaille sur la plateforme à temps plein, d'une part les autres chercheurs et chercheuses sont à l'origine des premières phases de programmation de la plateforme et d'autre part ces « informaticiens » ont un parcours de physiciens. D'un point de vue onto-épistémologique, la position *structuraliste* domine ici comme chez les géographes quantitativistes, mais nous avons repéré également deux *agnostiques*, l'un avec un parcours d'informaticien et l'autre avec un parcours de mathématicien.

[2762] Deux physiciens italiens s'inscrivant dans les SSC.

Théories et modèles produits par nos interviewés

Le groupe du LANL est à l'origine d'une multiplicité de plateformes de simulation différentes, dont la plus connue porte le nom d'EpiSimS[2763]. Il s'agit d'un logiciel programmé en C++ finalisé pour la simulation des épidémies d'influenza. Il est défini comme un MBA stochastique qui représente explicitement chaque personne dans une ville, ainsi que les lieux de la ville où les personnes interagissent. L'environnement où se déplacent les agents se compose de routes, d'écoles et de commerces de tout type. La population est construite statistiquement sur la base de données de recensement de la zone géographique modélisée. Chaque agent a un certain nombre d'activités assignées pour chaque jour : maison, travail, achats, visites, loisirs, école, etc. EpiSimS intègre ensuite des statistiques concernant les heures, la durée et la géo-localisation de chacune de ces activités. Les bâtiments sont structurés en chambres où les activités ont lieu. Cela sert à distinguer le type d'interactions, qui n'impliquent pas toutes le même niveau de proximité.

EpiSimS est nourri de données historiques d'épidémies anciennes. Les agents peuvent être sains, non-contagieux et en incubation, puis pré-symptomatiques, puis contagieux-symptomatiques ou contagieux-asymptomatiques. Les contagieux-asymptomatiques passent à travers une étape de basse contagiosité pour enfin se soigner. Les contagieux-symptomatiques peuvent soit continuer à faire leurs activités soit ils peuvent rester à la maison. Ceux qui continuent leurs activités passent par un état moins contagieux, avant de se soigner. Ceux qui restent à la maison se divisent entre ceux qui manifestent des complications graves comme la pneumonie et ceux qui n'en ont pas. Ceux qui manifestent des complications peuvent soit mourir soit se soigner. Dans EpiSimS, les scénarios dépendent d'un ensemble de paramètres qui représentent des modifications de comportement, des interventions médicales et des interventions non-médicales, chacune desquelles a des paramétrages de début et de fin. LANL 4 nous a raconté qu'EpiSimS est en standby, car les données qui nourrissent ce modèle-simulation sont trop anciennes. La base de données est achetée auprès d'une entreprise privée, qui les vend pour quelques centaines de milliers de dollars. Selon le chercheur, le potentiel de cette plateforme reste grand, puisqu'elle peut simuler l'ensemble des États-Unis, avec la totalité de ses 300 millions d'habitants.

La plateforme GLobal Epidemic and Mobility visualization (ou GLEaMviz), qui est en réalité une famille de modèles, est un logiciel développé par plusieurs équipes, à Boston, à Bloomington, à Paris, à Turin et à Trente[2764]. Chaque équipe peut à la fois développer un GLEaMviz partagé et un ou plusieurs GLEaM pour usage interne. Cette plateforme se base sur l'approche d'origine écologique par métapopulations, qui

[2763] Mniszewski, S., Del Valle, S., Stroud, P., Riese, J., Sydoriak, S., « EpiSimS simulation of a multi-component strategy for pandemic influenza », *Proceedings of the 2008 Spring simulation multiconference*, 2008, pp. 556–563.

[2764] Van den Broeck, W. et al., « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », *op. cit.* ; page dédiée à GLEaMviz sur le site de l'ISI : https://www.isi.it/en/projects/gleamviz.

fonctionne par populations de populations, et sur la théorie des réseaux et la physique statistique. Dans GLEaMviz l'espace est discrétisé pour permettre de sectionner le réseau mondial en plusieurs sous-réseaux interconnectés. Un nœud y représente non pas un agent humain ou animal, mais une population d'humains ou d'animaux. Un lien y représente une mobilité entre deux nœuds (avion, voiture, train). À la différence des MBA, où chaque agent a une identité virtuelle, l'approche par métapopulations fonctionne par classes d'individus et donc ceux-ci ne sont pas simulés un par un. Pour cette raison, au dit de ses développeurs, GLEaMviz peut ainsi simuler une pandémie au niveau planétaire, mais ne peut pas arriver au détail des MBA pour prendre des décisions spécifiques au niveau national. Les MBA, de leur côté, simulent dans le détail des régions géographiques même vastes, mais ils ne peuvent pas simuler la planète entière, par manque de données et par surcoût en termes de puissance computationnelle.

GLEaMviz est défini comme un schéma computationnel stochastique qui intègre des données mondiales de démographie et de mobilité à haute résolution, générant une carte dynamique et une série de diagrammes qui décrivent l'évolution géo-temporelle de la maladie. Téléchargeable gratuitement, cette plateforme possède une interface graphique permettant à l'usager de régler librement le modèle avec ses propres paramètres avant de lancer la simulation. Les créateurs de GLEaMviz visent à maintenir une forte flexibilité dans ses emplois. L'usager peut en effet dessiner des modèles compartimentés arbitraires, décider les caractéristiques de chaque compartiment, notamment la mobilité de chaque classe d'individus ou le degré de saisonnalité d'une maladie ; l'usager peut aussi établir les conditions temporelles et géographiques initiales, le profil immunitaire de chaque population, le nombre de simulations stochastiques à réaliser, ainsi que la durée de chaque simulation (traduite en nombre de jours virtuels). La visualisation géo-temporelle de l'épidémie résultante est interactive, chaque carte venant accompagnée d'un graphe. Enfin, le tout est visualisable sous la forme de vidéo fluide ou selon un chemin incrémental.

Conception de leur spécialité selon nos interviewés

Arnaud Banos, géographe modélisateur, a également travaillé sur l'épidémiologie computationnelle. Il explique de son point de vue que l'un des obstacles majeurs pour la légitimité de ce nouveau domaine réside dans le fait que ceux et celles qui le portent manquent d'un parcours médical. Les épidémiologistes computationnels doivent donc, à son avis, montrer qu'ils savent maîtriser les connaissances et les codes des médecins : « C'est difficile de faire de l'épidémiologie sans être médecin aujourd'hui dans le monde […] Donc une des difficultés dans ce domaine-là c'est de réussir à faire des liens avec tous les canons en vigueur dans ces domaines »[2765]. Vespignani, qui hésite à se définir un épidémiologiste, explique que la priorité pour lui est d'avoir un

[2765] Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.

impact réel sur la santé publique, la reconnaissance de la part des professionnels de l'épidémiologie envers ses travaux en étant une conséquence et la publication d'articles étant presque un aspect secondaire dans ce processus[2766].
À la question directe, « Êtes-vous encore à la recherche d'une légitimité pour vos modèles ? », Colizza répond :

> « Je dirais que non, le travail où on a cherché à répondre à cette question c'est celui sur la pandémie [de H1N1], où on a publié des prédictions […] Erreur dans 17% des cas, je veux dire : pour chaque pays on a prévu une semaine de pic avec un intervalle de confiance. Dans 83% des cas le pic tombait dans cette semaine-là »[2767].

Si quelques pays, comme le Royaume Uni ou l'Italie, se sont dotés de *pool* d'épidémiologistes computationnels dans les instituts de santé nationaux, tandis que l'OMS et l'European CDC en sont encore dépourvus, l'appui sur ces méthodes de la part des pouvoirs publics ne s'est pas fait sans résistances. Vespignani relate que les approches computationnelles n'étaient pas, au début, bien reçues par les épidémiologistes de terrain : « il y a quelques années il y avait ceux qui étaient contre : 'Non, toutes ces choses de *modeling* il faut pas, l'épidémiologie est autre chose, c'est le travail sur le terrain' »[2768]. Paolotti, qui fait également allusion à une période initiale où ces méthodes étaient vues comme « hérétiques », explique que ce qui, pour sa catégorie, est fondamental afin de gagner en légitimité, et pour sceller la conversion complète de physicien à épidémiologiste, c'est la capacité de « coloniser » les espaces institutionnels de santé publique. À cet égard, Paolotti prend pour exemple Colizza :

> « Aux États-Unis [l'épidémiologie computationnelle] est une chose acceptée. En Italie les épidémiologistes classiques viennent de commencer à s'y intéresser, en tout cas ils ont compris qu'il s'agit d'instruments qu'ils peuvent utiliser et aussi en Europe on a envie d'apprendre à les utiliser […] Ça a été grâce au travail de personnes comme Vittoria [Colizza], laquelle maintenant travaille dans un institut de santé publique, c'est quelqu'un qui est venu du monde de la physique […] et maintenant elle est un *public health officer*. Du coup elle a fait la transition complète […] Donc il a été nécessaire de coloniser tout une série d'instituts de santé publique pour commencer à avoir de la crédibilité »[2769].

Les épidémiologistes computationnels, plus que les géographes quantitativistes, peuvent ainsi être vus comme des « acteurs » archétypiques du modèle de la sociologie de la traduction de Bruno Latour et Michel Callon. Ils pourraient être bien décrits par

[2766] Entretien avec Alessandro Vespignani, 11.07.16.
[2767] Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
[2768] Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
[2769] Entretien avec Daniela Paolotti, 16.02.17.

la métaphore du « réseau », que l'épidémiologiste-entrepreneur devrait stratégiquement construire en enrôlant des acteurs hétérogènes, afin de se faire *point de passage obligé*. Si l'interfaçage entre ce type de scientifiques et les organismes non-académiques apparaît plus avancé par rapport à la géographie quantitative, ce n'est pas seulement dû à des raisons techniques ou épistémologiques, liées à la fiabilité et à la performance des modèles, mais surtout au mode de fonctionnement sociologique de ces deux spécialités, l'une étant par définition davantage dépendante du *travail transépistémique* que l'autre.

Glossaire

Anomie
L'*anomie*, pour Durkheim, décrit le manque de solidarité organique dans un organisme social ; elle apparaît lorsque les individus s'isolent les uns des autres et perdent la vision d'ensemble et le sens d'appartenance à une œuvre commune.

Apurement
L'*apurement* est le terme qu'Emmanuel Didier utilise pour désigner le processus de nettoyage, standardisation et construction des données qui se fait par le jugement du statisticien.

Arène transépistémique
Knorr-Cetina élargit et complète le concept de *culture épistémique* avec celui d'*arène transépistémique*, pour dépasser les frontières du laboratoire et indiquer tous les espaces où les scientifiques, les administrateurs, les experts, les entrepreneurs et les décideurs se rencontrent pour discuter, financer et mettre en place les technosciences.

Causes d'Aristote
Dans sa *Métaphysique*, Aristote désigne quatre causes fondamentales pour expliquer tout phénomène : *matérielle*, *formelle*, *efficiente* et *finale*. En utilisant une métaphore issue du domaine artistique, celle du dessin, on peut définir le couple formé par la main et le stylo comme la *cause efficiente*, le papier et l'encre comme la *cause matérielle*, la forme du dessin comme la *cause formelle*, tandis que l'aspect perceptuel et sémantique du dessin comme la *cause finale*.

Centre de calcul
Bruno Latour a défini un *centre de calcul* comme une tête de réseau dans laquelle des acteurs produisent des inscriptions qui tiennent ensemble beaucoup d'autres inscriptions, afin d'étendre davantage le réseau.

Circulation de la référence
Bruno Latour a défini la *circulation de la référence* comme le phénomène de traduction d'une matière vers une forme, dans une série de traductions successives qui accomplissent plusieurs allers-retours entre matière et forme, entre objet d'étude et inscriptions.

Cité par projets

Luc Boltanski et Laurent Thévenot ont défini les *cités* comme des formes d'accords en fonction desquelles les individus peuvent justifier leurs actions dans des situations données, ou au nom desquelles ils peuvent résoudre des conflits ou des controverses. Ensuite Luc Boltanski et Ève Chiapello ont défini la *cité par projets* comme la cité dans laquelle les valeurs de référence sont la réalisation de projets, l'extension du réseau et la prolifération des liens, où les caractéristiques valorisées sont l'enthousiasme, la flexibilité, l'autonomie, l'employabilité, et dont la figure type est celle du coach ou du chef de projet.

Coïncidence idéologique

Nous avons défini la *coïncidence idéologique* comme la situation dans laquelle un groupe d'individus, par exemple une institution, se retrouve sur la même longueur d'onde axiologique, politique et économique que d'autres groupes d'individus, par exemple des financeurs.

Communauté (ou régime) d'anticipation

Céline Granjou a défini *régime* ou *communauté d'anticipation* comme un groupe de chercheurs et de chercheuses, d'experts et de managers qui partagent une vision particulière du futur, une certaine culture épistémique et une certaine vision du rapport entre science et politique. Une *communauté d'anticipation* partage donc un certain ensemble de savoir, une certaine idéologie et une certaine forme d'action.

Connaissance tacite

Concept forgé par le philosophe, chimiste et économiste hongrois, Michael Polanyi, il a été rendu célèbre dans les STS par Harry Collins. On appelle *connaissance tacite* la capacité à exécuter des tâches tout en n'étant pas capable de verbaliser son fonctionnement : l'exemple typique est la conduite du vélo.

Contre-performativité

Donald MacKenzie distingue la performativité générale de celle particulière : la première est celle qui détermine toute action humaine culturelle et non-naturelle ; la deuxième suit Austin et est plus spécifique, se référant aux choses qui adviennent parce qu'on dit qu'elles adviennent. Ensuite, MacKenzie introduit la notion de *contre-performativité* pour se référer à ces actes qui se veulent performatifs et qui finissent par produire l'effet contraire.

Convergence asymétrique

Kelly Moore, Daniel Kleinman, David Hess et Scott Frickel décrivent la relation inégale entre le monde de l'université et de la recherche d'une part, et le monde

industriel et financier d'autre part, en parlant de *convergence asymétrique*. Dans ce processus, si l'académie intègre des modes de fonctionnement du monde entrepreneurial, et que l'entreprise intègre des modes de fonctionnement du monde académique, le processus n'est pas symétrique, les objectifs et la culture dominante dans les deux mondes étant celle de l'industrie et du management.

Coproduction

Sheila Jasanoff a défini la *coproduction conjointe de science et société* comme ce phénomène dans lequel les savoirs et les formes d'organiser le monde s'inter-influencent de manière inextricable. Il s'agit d'un geste anti-idéaliste, pour abandonner la vision des sciences comme d'un monde des idées platonicien, et anti-bourdieusien, pour déconstruire l'idée de l'autonomie de la science par rapport à la société.

Culture épistémique

Concept introduit par Karin Knorr-Cetina, il s'agit d'un amalgame de dispositions et de mécanismes sociaux, d'un ensemble de savoirs théoriques et pratiques, ainsi que d'un certain nombre de règles techniques et institutionnelles, qui façonnent la production de la connaissance d'un certain groupe d'individus. Inspirée de la conception anthropologique de la culture et conçue pour contrecarrer l'idée du Cercle de Vienne selon lequel la science tout entière suit une seule manière de fonctionner, cette notion implique l'existence d'une variété de manières de produire du savoir qui sont liées aux différences sociales, matérielles et symboliques des groupes pris en examen. Ce concept nous intéresse pour sa capacité à inclure tous les aspects composant la vie des cultures scientifiques et parce qu'il n'établit pas un niveau unique de pertinence, pouvant être décliné à toutes les échelles : celle d'un laboratoire, celle d'une spécialité, celle d'une discipline, etc.

Cycle de la crédibilité

Bruno Latour et Steve Woolgar ont défini le *cycle de la crédibilité* comme l'ensemble des stratégies que les scientifiques emploient pour gagner en crédibilité, dont les formes différentes sont traduisibles les unes dans les autres.

Engagements épistémiques

Concept utilisé par Céline Granjou et Isabelle Arpin, celui *d'engagement épistémique* décrit le travail de recherche *en tant qu'*engagement éthique et politique tourné vers la production d'un certain type de connaissances. Il sert à rendre compte des différentes catégories de scientifiques, managers et décideurs qui se trouvent engagés dans la production d'un certain type de connaissances, dans le but de mener un certain type de politique de recherche.

Esprit gestionnaire
Albert Ogien appelle *esprit gestionnaire* l'usage stratégique de la quantification et de l'information pour contrôler les corps des personnels participant à une chaîne de production.

Faute grammaticale
Cyril Lemieux a défini une *grammaire* comme l'ensemble des règles qu'un individu doit suivre dans une société pour être reconnu comme sachant agir et juger correctement. Lorsqu'un individu ne respecte pas la *grammaire* publique de son groupe social, il commet une *faute grammaticale*.

Forme épistémique
La notion de *forme épistémique* a été définie par Cyril Lemieux et Bruno Karsenti pour désigner les tendances intellectuelles constitutives d'une discipline ou d'une idéologie. Il s'agit de l'ensemble des principes structurant la manière dont un savoir ou un discours politique appréhendent le monde.

Forum hybride
Michel Callon, Pierre Lascoumes et Yannick Barthe ont défini les *forums hybrides* comme des espaces publics ouverts à plusieurs collectifs hétérogènes (experts, politiques, profanes) qui souhaitent débattre autour d'un problème d'ordre éthique, économique ou technoscientifique.

Friction computationnelle
Paul Edwards appelle *friction computationnelle* toute la série d'obstacles et de résistances qu'un individu ou un groupe rencontrent dans le chemin de la production d'un calcul.

Friction de données
Paul Edwards appelle *friction de données* toute la série d'obstacles et de résistances qu'un individu ou un groupe rencontrent dans le chemin de la production d'une série de données.

Histoire indigène
Histoire indigène est le nom que Wolf Feuerhahn a donné aux récits produits par des individus issus d'une discipline et qui portent sur cette dernière avec une perspective qui se veut extérieure.

Horizon de rétrospection
Sylvain Auroux appelle *horizon de rétrospection* l'ensemble des références qu'un ensemble de chercheurs et de chercheuses mobilise, à un moment historique donné, pour les nécessités du présent, en soutenant des visions du champ contre d'autres versions rivales, ou en aplatissant les rivalités et les décalages existants. Il représente la boîte à outils épistémologique, conceptuelle et technique dans laquelle puise le groupe pour constituer son domaine et pour mener ses recherches.

Idéologie
Dans cette thèse nous avons employé une version non-péjorative du terme d'idéologie, pour indiquer plutôt l'ensemble de valeurs éthiques et esthétiques, une vision de l'ordre social et une métaphysique.

Imaginaire sociotechnique
Sheila Jasanoff a défini l'*imaginaire sociotechnique* comme l'ensemble des visions désirables du futur qui sont institutionnellement stabilisées et performées publiquement. L'élément technoscientifique y est vu comme fondamental pour la réalisation d'une certaine forme de vie sociale.

Ingénierie de l'interdisciplinarité
Nous avons défini l'*ingénierie de l'interdisciplinarité* comme l'ensemble des stratégies discursives, organisationnelles et architecturales qui sont menées pour mettre en place et entretenir le travail scientifique interdisciplinaire.

Interculturalité épistémique
En nous inspirant de l'approche anthropologique de Peter Galison et Karin Knorr-Cetina, nous avons remplacé le terme indigène et problématique d'interdisciplinarité par celui d'*interculturalité épistémique*.

Métrologie
Métrologie est le nom, rendu d'usage commun en STS par Bruno Latour, que l'on donne à l'ensemble des infrastructures planétaires qui font exister des capacités techniques – telles que l'horaire ou la météo – désormais naturalisées. Banales, allant de soi, ces capacités techniques sont si ubiquitaires et performantes qu'elles nous ont fait oublier les *frictions computationnelle* et *de données*, ainsi que le coût faramineux qui sont nécessaires pour leur réalisation et pour leur maintien.

Modèle de l'instruction publique
Le *modèle de l'instruction publique* est l'une des trois formes que Michel Callon a défini pour la démocratie technique. Dans celui-ci, les scientifiques sont censés

instruire le public de manière compréhensible et ne peuvent rien apprendre du public profane ; en outre, dans ce modèle la science est autonome mais pas indépendante, car elle se plie au contrôle et aux requêtes des pouvoirs publics.

Ontologie

Concept riche, stratifié et débattu, celui d'ontologie est défini ici très simplement comme la vision de l'essence qu'un individu ou groupe attribue à quelque chose. On peut parler d'ontologies de la nature – par exemple, l'univers est composé uniquement de matière et d'énergie ou aussi d'information ? – ou bien d'ontologies de la société – par exemple, les êtres humains sont déterminés et donc prédictibles ou dotés de libre arbitre et donc imprédictibles ? En philosophie la métaphysique étudie, au sens aristotélicien, les modalités et propriétés des différentes formes de l'être (par exemple le vrai ou le devenir) ou, au sens kantien, les modalités de la connaissance (à savoir les transcendantaux de la gnoséologie), tandis que l'ontologie étudie l'être en tant qu'être. Tout en étant conscient de cela, nous traitons les deux termes comme des synonymes.

Plateforme/carrefour méta-disciplinaire

Nous avons proposé le concept de *plateforme méta-disciplinaire* pour désigner les communautés scientifiques qui partagent un projet onto-épistémologique peu défini, un ensemble d'outils communs et des stratégies politico-institutionnelles convergentes. Sorte de confédérations, où chaque « nation » disciplinaire garde son autonomie tout en s'alliant avec d'autres pays du savoir qu'elle reconnaît comme autonomes, les *plateformes méta-disciplinaires* servent à permettre à des scientifiques hétérogènes de se rencontrer et de collaborer, pour atteindre un certain nombre d'objectifs théoriques, sociaux et institutionnels communs ou analogues. Les *carrefours méta-disciplinaires* partagent une série de lieux, tels que des instituts, des conférences ou des sociétés savantes, où elles peuvent discuter, collaborer, échanger et concevoir des stratégies pour s'élargir ou pour survivre. Afin de trouver une cohérence dans l'extrême diversité, les outils théoriques et techniques sont particulièrement ductiles.

Positions/visions onto-épistémologiques

Nous proposons la formule d'*onto-épistémologie indigène* ou de *position/vision onto-épistémologique* pour nommer l'union inextricable entre le volet du *connaître* et le volet de l'*être* tel que tenu par un groupe social. Les conditions de validité de la connaissance sont autrement dit inséparables de la vision de l'essence du monde que les scientifiques possèdent.

Pratiques de l'agrégation

Pratiques de l'agrégation est le nom qu'Emmanuel Didier donne à l'ensemble des techniques et de stratégies de construction, reconstruction, purification de données, dont l'*apurement* est un exemple.

Prémédiation

Selon le « massmédiologue » Richard Grusin, depuis la dernière décennie du XX^{ème} siècle, les médias globaux mettent en place la *prémédiation*, à savoir le fait de médiatiser un certain nombre de scénarios possibles, souvent catastrophiques, avant qu'ils n'arrivent. L'objectif est celui de préparer le public à des événements surprenants mais possibles, voire probables. Elle se déploie dans le but de maintenir chez les spectateurs un faible niveau d'anxiété afin d'éviter des chocs et des surprises.

Régime conventionnaliste

Le *régime conventionnaliste* fait partie d'une triade de régimes décrits par Francis Chateauraynaud et désigne un mode de faire science qui repose sur des ontologies partagées pour qu'une preuve soit établie (par exemple les statistiques).

Régime d'anticipation.

Voir *communauté d'anticipation*.

Régime d'axiomatique autonome

Le *régime d'axiomatique autonome* fait partie d'une triade de régimes décrits par Francis Chateauraynaud et désigne un mode de faire science qui permet d'engendrer des actions et des jugements qui n'ont plus de compte à rendre à la réalité, de par la cohérence interne au mode qui dans certains cas peut se passer de tout recoupement avec l'expérience (par exemple, les mathématiques).

Régime de l'administration de la preuve

Nous désignons avec ce terme l'ensemble des stratégies argumentatives, des mises en scène et des pratiques que les scientifiques emploient pour faire preuve, c'est-à-dire pour appuyer un résultat et pour le rendre crédible aux yeux de leurs paires et/ou d'autres groupes sociaux.

Régime de l'économie des processus technoscientifiques

Pierre-Benoît Joly appelle *régime de l'économie des processus technoscientifiques* le mode de fonctionnement où s'interfacent des scientifiques, des entrepreneurs et des pouvoirs publics pour la mise en place d'un nouveau domaine des technosciences. Les discours promettants, les représentations, les pratiques d'exploration et

d'expérimentation, ainsi que les modes de collecte, de mobilisation et d'accumulation des ressources, s'articulent dans le but de réaliser un projet donné.

Régime de l'énonciation des futurs
Le concept de *régime d'énonciation des futurs* introduit par Francis Chateauraynaud se caractérise par quatre éléments : une modalisation du temps, une logique d'action, un prototype et la forme que peut prendre la critique envers chacun des régimes définis par le sociologue. Une liste non-exhaustive et non-étanche inclut les régimes de l'urgence, de l'attente, de l'anticipation, de la prévision, de la prospective, de la promesse, de la prophétie et de la science-fiction.

Régime de production de connaissances
Dominique Pestre utilise le concept de *régime de production de connaissances* pour périodiser l'histoire des technosciences. Il définit un régime comme l'articulation spécifique, et hégémonique à une époque donnée dans un lieu donné, entre une série d'éléments tels que les productions intellectuelles et techniques, les pratiques instrumentales, les valeurs et les normes, les institutions, les réalités économiques et juridiques, etc.

Régime phénoménologique
Le *régime phénoménologique* fait partie d'une triade de régimes décrits par Francis Chateauraynaud et désigne un mode de faire science qui s'appuie sur les expériences et les prises communes (par exemple les sciences sociales).

Rémédiation
Selon Richard Grusin et Jay David Bolter, la *rémédiation* se réfère à la tension entre deux logiques médiatiques contradictoires, l'immédiateté et l'hypermédiatisation, respectivement la manifestation de deux logiques hétérogènes mais qui peuvent s'entremêler : la transparence et la multiplicité.

Réouverture d'une boîte noire
Une *boîte noire* est, pour Bruno Latour, tout énoncé ou toute objet technique dont on ne remet plus en cause le contenu ou le cheminement. *Rouvrir une boîte noire* revient donc à questionner ce qui n'est plus discuté.

Simulat
Dans le langage de Franck Varenne, le simulat désigne le résultat d'une simulation numérique comme le filtrat désigne le résultat d'une filtration.

Style de pensée
Pour Ludwig Fleck un *style de pensée* désigne le cadre dans lequel les objets d'étude des scientifiques modifient leurs modes de connaissance et leurs structures sociales. Ainsi par exemple, des spécialistes des réseaux auront tendance à se voir, se décrire et à se structurer sous forme de réseaux.

Style de raisonnement
À partir d'une notion d'Alistair Crombie, Ian Hacking a défini un certain nombre de *styles de raisonnement*, chacun introduisant de nouveaux objets d'étude, des critères propres de validité de la connaissance et des techniques de stabilisation.

Tendance unificatrice
Nous avons appelé *tendance unificatrice* la propension de certains scientifiques – souvent des physiciens ou alors des non-physiciens qui érigent la physique à modèle pour les autres disciplines scientifiques – à chercher des principes unificateurs pour expliquer les phénomènes complexes et hétérogènes de la nature.

Tisseur de liens
Nous avons appelé *tisseur de liens* ce que d'autres appellent *faiseur de réseaux*, à savoir des individus, groupes ou institutions dont l'une des activités principales est de mettre en relation d'autres personnes, groupes ou institutions à des fins de collaboration.

Topiques de la preuve
Francis Chateauraynaud propose un dispositif conceptuel pour tenir ensemble à la fois le niveau formel, le niveau empirique et le niveau sociologique dans ce qui constitue la tangibilité d'une preuve, que cela soit dans une controverse sociotechnique ou dans une controverse académique. Le sociologue propose de définir la « preuve » comme la conséquence d'un « réseau » de faits, d'objets et de personnes, où elle vient à servir d'image de l'expérience, sans être l'expérience elle-même, en soi irréductible. Chateauraynaud repère ensuite cinq *topiques de la preuve* : 1) l'attestation directe par les sens ou la *prise* sur un phénomène ; 2) la logique de la *redondance* et du cumul des témoignages ; 3) la topique de la *corrélation statistique* dans un espace de calcul ; 4) le *modèle de confinement* et d'exactitude représentée par le laboratoire, où toute expérience est censée être reproductible ; enfin, 5) la topique du *raisonnement argumentatif*. Ces topiques peuvent se chevaucher et coexister, bien que selon la spécialité ou le domaine de recherche une forme dominante s'impose par rapport aux autres.

Tradition

Une *tradition* est ce dont une communauté se souvient pour trouver une identité commune et dont elle assure la transmission d'une génération à l'autre. Terme qui permet d'indiquer la continuité socio-épistémique dans le changement, celui de *tradition* rend des courants de recherche intelligibles d'un point de vue à la fois théorique, social et chronologique.

Travail de démarcation

Thomas Gieryn a défini le *travail de démarcation* comme l'attribution d'un certain nombre de caractéristiques à une institution scientifique pour la séparer d'autres activités intellectuelles. Ce concept est devenu d'usage commun dans les STS pour désigner tout travail social et épistémique finalisé à la création, à la critique ou au renforcement de frontières sociales entre secteurs différents du champ des savoirs. Ce type de travail implique souvent de tenir des discours variés selon les interlocuteurs afin d'atteindre des objectifs données.

Vigilance épistémique

On appelle *vigilance épistémique* l'attention critique que l'on porte à un certain phénomène intellectuel ou socioculturel.

Voies de légitimation scientifique

Pierre-Olaf Schut et Matthieu Delalandre ont proposé le concept de *voies de la légitimation scientifique* pour désigner l'ensemble des pratiques, des techniques, des institutions, des identités sociales et des stratégies mises en place par un groupe de scientifiques pour fonder un nouveau domaine des connaissances.

Zone de transaction

Le concept de *zone de transaction* a été proposé par Peter Galison en s'inspirant de l'anthropolinguistique pour désigner un domaine intermédiaire entre plusieurs sous-cultures, où plusieurs procédures scientifiques sont négociées, coordonnées et implémentées. Grâce à la création de langages intermédiaires communs, des groupes culturellement différents peuvent échanger des biens, des outils, des savoirs, même en ayant des métaphysiques de départ différentes par rapport à ces objets.

Liste des figures

Fig. 1……213
Fig. 2……213
Fig. 3……246
Fig. 4……316
Fig. 5……380
Fig. 6……383
Fig. 7……384
Fig. 8……385
Fig. 9……386
Fig. 10……387
Fig. 11……408
Fig. 12……427
Fig. 13……436
Fig. 14……437
Fig. 15……438
Fig. 16……439
Fig. 17……440
Fig. 18……443
Fig. 19……486
Fig. 20……489
Fig. 21……562
Fig. 22……573
Fig. 23……573
Fig. 24……580
Fig. 25……580
Fig. 26……581
Fig. 27……584
Fig. 28……599
Fig. 29……600
Fig. 30……600
Fig. 31……607
Fig. 32……607
Fig. 33……608
Fig. 34……608
Fig. 35……619
Fig. 36……624
Fig. 37……625
Fig. 38……629

Bibliographie

Thèses, livres et articles scientifiques, articles de presse et en ligne

Abbott, A., *Chaos of disciplines*, Chicago, University of Chicago Press, 2001.

Abir-Am, P.G., *The Double Helix : A Historical Analysis of Uniqueness in a Transdisciplinary Discovery*. Jerusalem, The Hebrew University, 1975.

Abraham, R.H., « The Genesis of Complexity », *World Futures: The Journal of Global Education*, 67: 4-5, 2011, pp. 380-394. Disponible en ligne : http://dx.doi.org/10.1080/02604027.2011.585915.

Ackerman, E.A., « Where is a Research Frontier ? », *Annals of the Association of American Geographers* 1963, vol. 53, pp. 429-440.

Adorno, T.W., Frenkel-Brunswik, E., Levinson, D.J., & Sanford, R.N., *The authoritarian personality*, New York, Harper & Row, 1950.

Ahrens, W. & Pigeot, I. (ed.), *Handbook of Epidemiology*, New York, Heidelberg, Dordrecht & Londres, Springer, 2014.

Akiyama, S., Fukuyama, K., Nakada, H., Sugita, H., Tamagawa, A., (ed.), *Functions in Number Theory and Their Probabilistic Aspects*, Kyoto, 2010, Kôkyûroku Bessatsu Series, RIMS, Kyoto University, vol. B34 (2012), pp. 27-38.

Alberts, D.S. & Czerwinski, T.J., *Complexity, global politics, and national security*, Washington, National Defense University, 1997, disponible en ligne : http://www.dodccrp.org/files/Alberts_Complexity_Global.pdf.

Allen, T.F.H., Giampietro, M. & Zellmer, A.J., *The two faces of complexity*, non-publié.

Allen, P.M., *Cities and Regions as Self-Organizing Systems*, Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 1997.

Agamben, G., *Qu'est-ce qu'un dispositif ?*, Paris, Rivages poche/Petite Bibliothèque, 2007.

Allouche, J.-P., Baake, M., Cassaigne, J. & Damanik, D., « *Palindromic complexity* », *Theoretical Computer Science*, vol. 292, n. 1, 2003, pp. 9-31.

Allouche, J.-P., « Surveying some notions of complexity for finite and infinite sequences », dans Matsumoto, K., Allouche, J.-P. & Lestocart, L.-J., « Peut-on mesurer la complexité ? », dans Lestocart, L.-J. (ed.), *Esthétique de la complexité. Pour un cognitivisme non-linéaire*, Hermann, 2017, pp. 331-346.

Althusser, L., *Philosophie et philosophie spontanée des savants (1967)*, Paris, François Maspero, 1974.

Anderson, P., « More Is Different », *Science*, New Series, 1972, vol. 177, n. 4047, pp. 393-396.

Anderson, C., « The End of Theory : The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete », *Wired*, 06.23.08. Disponible en ligne : https://www.wired.com/2008/06/pb-theory/.

Andersson, J. & Prat, P., « Gouverner le 'long terme'. La prospective et la production bureaucratique des futurs en France », *Gouvernement et action publique*, 2015, vol. 3, n. 3.

Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A., « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'histoire des sciences*, 2004, Tome 57, n. 2, pp. 243-303.

Arora, S. & Barak, B., *Computational Complexity : A Modern Approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009.

Atlan, H., *Entre le cristal et la fumée*, Paris, Seuil, 1979.

Atlan, H., *L'Organisation biologique et la théorie de l'information*, Paris, Seuil, 2006.

Atlan, H., *Le vivant post-génomique. Ou qu'est-ce que l'auto-organisation ?*, Paris, Odile Jacob, 2011.

Atten, M. & Pestre, D., *Heinrich Hertz. L'administration de la preuve*, Paris, PUF, 2002.

Aubin, D. & Dahan, A., « Writing the History of Dynamical Systems and Chaos : *Longue Durée* and Revolution, Disciplines and Cultures », *Historia Mathematica* 29, 2002, pp. 273-339.

Auroux, S., « Histoire des sciences et entropie des systèmes scientifiques. Les horizons de rétrospection », dans Schmitter, P. (dir.), *Geschichte der Sprachtheorie*. 1. *Zur Theorie und Methode der Geschichtsschreibung der Linguistik : Analysen und Reflexionen*, Tübingen, Narr, p. 29.

Auroux, S. & Colombat, B., « L'horizon de rétrospection des grammairiens de l'*Encyclopédie* », *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, n. 27, 1999, mis en ligne le 04.08.07, consulté le 14.10.12.

Auvray, G., Bocquet, J.-C., Bonjour, E. & Krob, D., *Complex Systems Design & Management. Proceedings of the Sixth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M 2015*, Berlin, Springer, 2016.

Axelrod, R., *The Complexity of Cooperation. Agent-Based Models of Competition and Collaboration*, Princeton, Princeton University Press, 1997.

Axelrod, R. & Cohen, M.D., *Harnessing Complexity. Organizational Implications of a Scientific Frontier*, New York, The Free Press, 1999.
Axtell, R.L., « Hayek Enriched by Complexity Enriched by Hayek », *Advances in Austrian Economics*, 2016, vol. 21, pp. 63-121.
Bachimont, B., « Signes formels et computation numérique : entre intuition et formalisme. Critique de la raison computationnelle », 2004, http://www.utc.fr/~bachimon/Publications_attachments/Bachimont.pdf.
Baianu, I.C., « Robert Rosen's Work and Complex Systems Biology », *Axiomathes*, 2006, vol. 16, n. 1-2, pp. 25-34.
Bailly, F. & Longo, G., *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*, Paris, Hermann, 2008.
Banos, A., *Modéliser, c'est apprendre. Itinéraire d'un géographe*, Paris, Éditions Matériologiques, 2016.
Barabási, A.-L. & Réka, A., « Emergence of scaling in random networks », *Science*, n. 286, 1999, pp. 509–512.
Barabási, A.-L., *Linked. How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*, Londres, Plume, 2003.
Barabási, A.-L., *Bursts. The Hidden Patterns Behind Everything We Do*, New York, Dutton, 2010.
Barberousse, A., Franceschelli, S. & Imbert, C., « Computer simulations as experiments », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 557-574.
Barrett, C.L., Eubank, S.G. & Smith, J.P., « If smallpox strikes Portland », *Scientific American*, 2005, vol. 3, n. 292.
Barrier, J., « La science en projets, financements sur projet, autonomie professionnelle et transformations du travail des chercheurs académiques », *Sociologie du travail*, 2011, n. 53, pp. 515–536.
Barthélemy, M., « Spatial networks », *Physics Reports*, 2011, vol. 499, n.1-3, pp. 1-101.
Barthélémy, J.-H., « Encyclopédisme et théorie de l'interdisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 165-170.
Bateson, G., *Steps to an Ecology of Mind : Collected Essays in Anthropology, Psychiatry, Evolution, and Epistemology*, Chicago, University Of Chicago Press, 1972.
Batty, M., *Cities and Complexity. Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractal*, Cambridge & London, MIT Press, 2005.
Batty, M., *The New Science of Cities*, Cambridge & London, MIT Press, 2013.
Batty, M. **&** Torrens, P.M., « Modelling complexity : The limits to prediction », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2001, document 201.
Batty, M., Axhausen, K.W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Ouzounis, G. & Portugali, Y., « Smart cities of the future », *The European Physical Journal Special Topics*, 2012, n. 214, pp. 481-518.
Batty, M., « Big data, smart cities and city planning », *Dialogues in Human Geography*, 2013, vol. 3, n. 3, pp. 274-279.
Batty, M., « How disruptive is the smart cities movement ? », *Environment and Planning B : Planning and Design*, 2016, vol. 43, n. 3, pp. 441-443.
Becker, H.S., *Les ficelles du métier*, Paris, La Découverte, 2002.
Beisbart, C., « How can computer simulations produce new knowledge ? », *European Journal Philosophy of Science*, 2012, p. 2, pp. 395-434.
Bénatouïl, T., « Critique et pragmatique en sociologie. Quelques principes de lecture », *Annales*, 1999, vol. 54, n. 2, pp. 281-317.
Bennett, C., « Logical Depth and Physical Complexity », dans Herken, R. (ed.), *The Universal Turing Machine : A Half-Century Survey*, Oxford, Oxford University Press, pp. 227-257.
Ben-David, J. & Collins, R., « Social Factors in the Origins of a New Science : The Case of Psychology », *American Sociological Review*, 1966, vol. 31, n. 4, pp. 451-465.
Besnier, J.-M. & Perriault, J., « Introduction générale », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 13-15.
Bessy, C., Chateauraynaud, F. & Lagrange, P., « Une collection inqualifiable. La controverse archéologique sur l'authenticité de Glozel », *Ethnologie française*, 1993, vol. 23, n. 3, pp. 399-426.
Berry, H. & Beslon, G., « De la modélisation comme poésie. La modélisation de systèmes biologiques complexes vue par deux modélisateurs », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 327-387.
Bertalanffy, L. von, *General System Theory. Foundations, Development, Applications*, New York, George Braziller, 1969, pp. 49-51.
Berry, B.J.L. & Pred, A. (ed.), *Central Place Studies : A Bibliography of Theory and Applications*, Philadelphia, Regional Science Research Institute, 1965.
Berry, B.J.L., *The Nature of Change in Geographical Ideas*, DeKalb, Northern Illinois University Press, 1978.

Berthoz, A. & Petit, J.-L. (dir.), *Complexité-Simplexité*, Nouvelle édition, Paris, Collège de France, 2014 (généré le 20 mars 2014), disponible sur Internet : http://books.openedition.org/cdf/3339, p. 166.
Bersini, H., *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie : l'omniprésence des réseaux*, Paris, Vuibert, 2005.
Bertin, E., Gandrillon, O., Beslon, G., Grauwin, S., Jensen, P. & Schabanel, « Les complexités : point de vue d'un institut des systèmes complexes », *Hermès*, 2011, n. 60, pp. 145-150.
Bessin, M., Bidart, C. & Grossetti, M. (ed.), *Bifurcations. Les sciences sociales face aux ruptures et à l'événement*, Paris, La Découverte, 2010.
Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Helbing, D., Kühnert, C. & West, G.B., « Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities », *PNAS*, 2007, vol. 104, n. 17.
Bettencourt, L.M.A., Lobo, J., Strumsky, D. & West, G., « Urban Scaling and Its Deviations : Revealing the Structure of Wealth, Innovation and Crime across Cities », *PLoS ONE*, 2010, vol. 5, n. 11, e13541.
Bettencourt, L. & West, G., « A unified theory of urban living », *Nature*, 2010, vol. 467.
Bey, H., *TAZ, zone autonome temporaire*, Paris, Éditions de l'Éclat, 1997.
Bidan, M., « L'économie numérique est une industrie lourde (1) : donner ces données », *The Conversation*, novembre 24, 2015 : https://theconversation.com/leconomie-numerique-est-une-industrie-lourde-1-donner-ces-donnees-50674.
Bieri, J., « Cognitive complexity-simplicity and predictive behavior », *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 1955, n. 51, pp. 263-268.
Bihouix, P., *L'âge d'or des low tech, Vers une civilisation techniquement soutenable*, Paris, Seuil, 2014.
Birks, J.B. (ed.), *Rutherford at Manchester*, New York, Benjamin, 1963.
Bloor, D., *Knowledge and social imagery*, Londres, Routledge, 1976.
Blum, M., « A machine-independent theory of the complexity of recursive functions », *Journal of the Association for Computer Machinery*, vol. 14, n. 2, pp. 322–336, 1967.
Bloomfield, B.P., *Modelling the World. The Social Constructions of System Scientists*, Oxford, Blackwell, 1986.
Bloor, D., *Knowledge and social imagery*, Londres, University of Chicago Press, 1991.
Bode, H., Mosteller, F., Tukey, F. & Winsor, C., « The Education of a Scientific Generalist », *Science*, June 3, 1949, vol. 109, pp. 553-558.
Boltanski, L., « Sociologie critique et sociologie de la critique », *Politix*, 1990, vol. 3, n. 10-11, pp. 124-134.
Boltanski, L. & Thévenot, L., *De la justification. Les économies de la grandeur*, Paris, Gallimard, 1991.
Boltanski, L. & Chiapello, È., *Le nouvel esprit du capitalisme*, Paris, Gallimard, 1999.
Bonneuil, C., « Cultures épistémiques et engagement public des chercheurs dans la controverse OGM », *Nature Sciences Sociétés*, 2006, vol. 14, n. 3, pp. 257-268.
Bouleau, N., *La modélisation critique*, Versailles, Éditions Quæ, 2014.
Bourdieu, P., « Le mort saisit le vif. Les relations entre l'histoire réifiée et l'histoire incorporée », *Actes de la recherche en sciences sociales*, avril/juin 1980, vol. 32-33, pp. 3-14.
Bourgine, P., Chavalarias, D. & Cohen-Boulakia, C. (ed.), *Déterminismes et complexités : du physique à l'éthique. Autour d'Henri Atlan*, Paris, La Découverte, 2008.
Borderon, M., Buchs, A., Leblan, V ; & Vecchione, E., « Réflexivité et registres d'interdisciplinarité. Une boussole pour la recherche entre natures et sociétés », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, vol. 23, n. 4, pp. 399-407.
Borup, M., Brown, N., Konrad, K., & Van Lente, H., « The sociology of expectations in science and technology », *Technology Analysis & Strategic Management*, 2006, vol 18, n. 3-4, pp. 285-298.
Brand, S., *How Buildings Learn. What happens to them after they're built, Londres,* Penguin, 1995.
Breton, P., *Une histoire de l'informatique,* Paris, Seuil, 1990.
Broca, S., « Épistémologie du code et imaginaire des 'SHS 2.0' », *Variations*, 2016, n. 19, p. 2, consulté le 30 septembre 2016 : https://journals.openedition.org/variations/701.
Broer, H., Takens, F. & Hasselblatt, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 3*, Amsterdam, North Holland, 2010.
Brown, N. & Michael, M., « A Sociology of Expectations : Retrospecting Prospects and Prospecting Retrospects », *Technology Analysis & Strategic Management*, 2003, n. 15, pp. 3-18.
Bruno, I., Clément, P. & Laval, C., *La grande mutation. Néolibéralisme et éducation en Europe*, Paris, Éditions Syllepse, 2010.
Bühler, E.A., Cavaillé, F. & Gambino, M., « Le jeune chercheur et l'interdisciplinarité en sciences sociales. Des pratiques remises en question », *Natures Sciences Sociétés*, 2006, vol. 14, n. 4, pp. 392-398.
Bulpin, K. & Molyneux-Hodgson, S., « The disciplining of scientific communities », *Interdisciplinary Science Reviews*, 2013, vol. 38.
Bunge, W., *Theoretical Geography*, Lund, Lunds Studies in Geography, Series C, 1966.
Burton, I., « The quantitative revolution and theoretical geography », *The Canadian Geographer*, 1963, vol. VII, n. 4, pp. 151-162.

Busch, L., *Le marché aux connaissances. Néolibéralisme, enseignement et recherche*, Versailles, Quæ, 2014.
Byrne, M., Cupples, M.E., Smith, S.M., Leathem, C., Corrigan, M., « Development of a complex intervention for secondary prevention of coronary heart disease in primary care using the UK Medical Research Council framework », *The American Journal of Managed Care*, 2006, n. 12, pp. 261-266.
Callon, M., « Pour une sociologie des controverses technologiques », *Fundamenta Scientiae*, 1981, vol. 2, n. 3-4, pp. 381-399.
Callon, M., « L'innovation technologique et ses mythes », *Gérer et comprendre*, mars 1994.
Callon, M., « Des différentes formes de démocratie technique », *Annales des Mines*, janvier 1998, pp. 63-73.
Callon, M., Lascoumes, P. & Barthe, Y., *Agir dans un monde incertain*, Paris, Seuil, 2001.
Cambrosio, A. & Keating, P., « The disciplinary Stake : the Case of Chronobiology », *Social Studies of Science*, 1983, vol. 14, pp. 323-353.
Carnino, G. & Marquet, C. « Les *datacenters* enfoncent le *cloud* : enjeux politiques et impacts environnementaux d'internet », *Zilsel*, vol. 3, n. 1, pp. 19-62.
Castellani, B., *Map of Complexity Science*, Cleveland, OH. Courtesy of Arts and Science Factory, LLC, dans Börner, K. & Theriault, T.N., « 9th Iteration (2013) : Science Maps Showing Trends and Dynamics », *Places & Spaces : Mapping Science*, disponible en ligne : http://scimaps.org/mapdetail/map_of_complexity_sc_154.
Castellani, B., « Brian Castellani on the Complexity Science », site de *Theory Culture & Society*, 9 octobre 2014, disponible en ligne : https://www.theoryculturesociety.org/brian-castellani-on-the-complexity-sciences/.
Castellani, B. & Hafferty, F.W., *Sociology and Complexity Science*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2009.
Castells, M., *La société en réseau. L'ère de l'information*, Paris, Fayard, 1998.
Casti, J.L., *Complexification. Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*, New York, Harper Collins Publishers, 1994.
Catellin, S., « Sérendipité et indisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 32-40.
de Certaines, J.D., « La Biophysique en France : Critique de la Notion de Discipline Scientifique », dans Lemaine, G., Macleod, R., Mulkay, M., Weingart, P., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, The Hague, Mouton & Co. & Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1976.
Chamak, B., « The Emergence of Cognitive Science in France : A Comparison with the USA », *Social Studies of Science*, vol. 29, n. 5, 1999, pp. 643-684.
Chamak, B., *Le Groupe des Dix ou les avatars des rapports entre science et politique*, Monaco, Editions du Rocher, 1997.
Charaudeau, P., « Pour une interdisciplinarité 'focalisée' dans les sciences humaines et sociales », *Questions de communication*, 2010, n. 17, pp. 195-222.
Chateauraynaud, F., *Prospéro. Une technologie littéraire pour les sciences humaines*, Paris, Éditions du CNRS, 2003.
Chateauraynaud, F., « L'épreuve du tangible. Expériences de l'enquête et surgissements de la preuve », dans Karsenti, B. & Quéré, L., *La croyance et l'enquête. Aux sources du pragmatisme. Raisons pratiques*, vol. 15, EHESS, 2004, pp. 167-194.
Chateauraynaud, F., *Nanosciences et Technoprophéties*, Paris, Document de travail GSPR-EHESS, 2005.
Chateauraynaud, F., *Argumenter dans un champ de forces. Essai de balistique sociologique*, Paris, Pétra, 2011.
Chateauraynaud, F., *Les sombres précurseurs. Une sociologie pragmatique de l'alerte et du risque*, Paris, Éditions de l'EHESS, 1999, 2013.
Chateauraynaud, F., « Regard analytique sur l'activité visionnaire », dans Bourg, D., Kauffman, A. & Joly, P.-B. (ed.), *Du risque à la menace*, PUF, 2013, pp. 287-310.
Chateauraynaud, F., « L'emprise comme expérience. Enquêtes pragmatiques et théories du pouvoir », *SociologieS*, Dossiers, Pragmatisme et sciences sociales : explorations, enquêtes, expérimentations, mis en ligne le 23 février 2015, consulté le 21 septembre 2018. URL : http://journals.openedition.org/sociologies/4931.
Chateauraynaud, F. & Debaz, J., « Des alertes à couper le souffle. Point sociologique sur les particules fines et la pollution atmosphérique », *Socioinformatique et Argumentation*, 15 octobre 2012 : http://socioargu.hypotheses.org/4129.
Chateauraynaud, F. & Debaz, J., *Aux bords de l'irréversible. Sociologie pragmatique des transformations*, Paris, Pétra, 2017.
Chateauraynaud, F. & Dubois, C., « Et si la climatologie devenait une science sociale comme les autres ? À propos du colloque 'Entre connaissance et action : regards croisés sur les enjeux climatiques et environnementaux' (Paris, décembre 2016) », à paraître dans *Nature, Sciences, Sociétés*, version révise du 12.05.18.
Chauvin, S. & Jounin, N., « L'observation directe », dans Paugam, S., *L'enquête sociologique*, Paris, PUF, 2010, pp. 143-165.
Chavalarias, D. & Cointet, J.-P., « The reconstruction of science phylogeny », *arXiv*:0904.3154v3, 20 juillet 2010.

Chavalarias, D. & Cointet, J.-F., « Phylomemetic patterns in science evolution. The rise and fall of scientific fields », *Plos One*, 2013, vol. 8, n. 2, e54847, disponible en ligne : http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0054847.

Chérel, G., Cottineau, C. & Reuillon, R., « Beyond Corroboration : Strengthening Model Validation by Looking for Unexpected Patterns », *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, n. 9, e0138212, doi:10.1371/journal.pone.0138212.

Chroley, R.J. & Haggett, P. (ed.), *Models in Geography*, Londres, Methuen & Co Ltd., 1967.

Cilliers, P., *Complexity and postmodernism. Understanding complex systems*, London and New York, Routledge, 1998.

Cohen, V., *La recherche opérationnelle*, Paris, PUF, 1995.

Cointet, J.-P. & Chavalarias, D., « Multi-level science mapping with asymmetrical paradigmatic proximity », *Networks and heterogeneous media*, 2008, vol. 3, n. 2, pp. 267-276.

Collectif ComMod, « La modélisation comme outil d'accompagnement », *Natures Sciences Sociétés*, 2005, n. 13, pp. 165-168.

Collins, H., *Changing order*, Chicago, University of Chicago Press, 1992.

Collins, R., « Les traditions sociologiques », *Enquête*, n. 2, 1995, mis en ligne le 26 janvier 2007, consulté le 12 avril 2014, disponible en ligne : http://enquete.revues.org/302.

Comité editorial de Nature, « End of the interlude ? », *Nature Biotechnology*, p. 22, p. 1191.

Cook, S.A., « The complexity of theorem-proving procedures », *Proceedings Third Annual ACM Symposium, Theory of Computing*, 1971.

Coriat, B. (ed.), *Le Retour des communs. La crise de l'idéologie propriétaire*, Paris, Les Liens qui libèrent, 2015.

Cottineau, C., *L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations*, 2014, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne.

Cottineau, C., « DARIUS Database. Harmonised Database of Cities in the Post-Soviet Space, 1840–2010 », *Figshare*, 2015, disponible en ligne : http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1108081.

Cottineau, C., « A Multilevel Portrait of Shrinking Urban Russia », *Espace, populations, sociétés*, 2015-2016, n. 3 & n. 1.

Cottineau, C., Reuillon, R., Chapron, P., Rey-Coyrehourcq, S. & Pumain, D., « A Modular Modelling Framework for Hypotheses Testing in the Simulation of Urbanisation », *Systems*, 2015, n. 3, pp. 348-377.

Cowan, G. (ed.), *Complexity. Metaphors, Models, And Reality*, Boston, Addison Wesley, 1994.

Cowan, G., *Manhattan Project to the Santa Fe Institute. The Memoirs of George A. Cowan*, Albuquerque, University of New Mexico Press, 2010.

Craig, P., Dieppe, P., Macintyre, S., Michie, S., Nazareth, I., & Petticrew, M., « Developing and evaluating complex interventions : the new Medical Research Council guidance », *British Medical Journal*, 2008, 337.

Crawley, E., Cameron, B. & Selva, D., *System Architecture. Strategy and Product Development for Complex Systems*, London, Pearson, 2015.

Cuyala, S., *Analyse spatio-temporelle d'un mouvement scientifique. L'exemple de la géographie théorique et quantitative européenne francophone*, Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2014.

Dahan, A., Chabert, J.-L. & Chemla, K., *Chaos et déterminisme*, Paris, Seuil, 1992.

Dahan, A. & Pestre, D. (ed.), *Les sciences pour la guerre. 1940-1960*, Paris, EHESS, 2004.

Darbellay, F. & Paulsen, T., *Le défi de l'inter- et transdisciplinarité. Concepts, méthodes et pratiques innovantes dans l'enseignement et la recherche*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.

Darbellay, F., « Vers une théorie de l'interdisciplinarité ? Entre unité et diversité », *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 2011, vol. 7, n. 1, pp. 65-87.

Darbelley, F. (ed.), *La circulation des savoirs. Interdisciplinarité, concepts nomades, analogies, métaphores*, Berne, Peter Lang, 2012.

Dardot, P. & Laval, C., *Commun. Essai sur la révolution au XXIème siècle*, Paris, La Découverte, 2014.

Debru, C., *La transdisciplinarité. Comment explorer les nouvelles interfaces*, Paris, Hermann, 2011.

Deffuant, G., Banos, A., Chavalarias, D., Bertelle, C., Brodu, N., Jensen, P., Lesne, A., Müller, J.-P., Perrier, E. et Varenne, F., « Visions de la complexité. Le démon de Laplace dans tous ses états », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, n. 23, pp. 42-53.

Delahaye, J.-P., *Complexité aléatoire et complexité organisée*, Paris, Quæ, 2009.

Delile, J., *Des comportements cellulaires à la morphogenèse embryonnaire : modélisation mécano-génétique et simulations computationnelles du développement animal précoce*, sous la direction de Nadine Peyriéras et René Doursat, Université Paris Diderot (Paris 7), thèse soutenue en 2013.

Demeulenaere É., Rivière, P., Hyacinthe, A., Balthassat, R., Baltazar, S., Gascuel, J.-S., Lacanette, J., Montaz, H., Pin, S., Ranke, O., Serpolay-Besson, E., Thomas, M., Van Frank, G., Vindras-Fouillet, C., Vanoverschelde, M. & Goldringer, I., « La sélection participative à l'épreuve du changement d'échelle. Trajectoire d'une collaboration entre paysans sélectionneurs et généticiens de terrain », *Natures Sciences Sociétés*, 2017, vol. 25, n. 4, pp. 336-346.

Descola, P., *Par-delà nature et culture*, Paris, Gallimard, 2005.
Desrosières, A., *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*, Paris, La Découverte, 2010.
Didier, E., *En quoi consiste l'Amérique ? Les statistiques, le New Deal et la démocratie, Paris,* **La Découverte, 2009.**
Dolby, R.G.A., « The Case of Physical Chemistry », dans Lemaine, G., Macleod, R., Mulkay, M., Weingart, P., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, The Hague, Mouton & Co. & Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1976.
Dosse, F., *L'empire du sens. L'humanisation des sciences humaines*, Paris, La Découverte, 1995.
Dowling, D., « Experimenting on Theories », *Science in Context*, 1999, vol. 12, n. 2, pp. 261-273.
Dubois, D., Hájek, P. & Prade, H., « Knowledge-driven versus data-driven logics », *Journal of Logic, Language and Information*, 2000, vol. 9, n. 1, pp. 65-89.
Dubois, M., « 'Private knowledge' et 'programme disciplinaire' en sciences sociales : étude de cas à partir de la correspondance de Robert K. Merton », *L'Année sociologique*, 2014, vol. 64, n. 1, pp. 79-119.
Dumouchel, P. & Dupuy, J.-P., (ed.), *L'auto-organisation. De la physique au politique*, Paris, Seuil, 1983.
Dumoulin, D. & Ollivier, G., « Comment peut-on être systématicien ? Faire exister une communauté scientifique : le cas français dans la dynamique internationale », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2013, vol. 7, n. 2, pp. 365-410.
Dupuy, J.-P., *Ordres et Désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, Paris, Seuil, 1982.
Dupuy, J.-P., « L'essor de la première cybernétique (1943-1953) », Cahier du CREA, n. 7, 1985, pp. 7-139.
Dupuy, J.-P., *Aux origines des sciences cognitives*, Paris, La Découverte, 1999.
Dupuy, J.-P., *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*, Paris, Seuil, 2004.
Dupuy, L., « Co, multi, inter, ou trans-disciplinarité ? La confusion des genres… », Document de travail à destination des étudiants du Certificat International d'Écologie Humaine, pp. 4 : https://web.univ-pau.fr/RECHERCHE/CIEH/documents/La%20confusion%20des%20genres.pdf.
Dupuy, G. & Benguigui, L.G., « Sciences urbaines : interdisciplinarités passive, naïve, transitive, offensive », *Métropoles*, 2015, n. 16 : http://journals.openedition.org/metropoles/5107.
Durkheim, É., *De la division du travail social*, Paris, PUF, 2016.
Edgerton, D., *The Shock of the Old. Technology and Global History since 1900*, Londres, Profile Books, 2008.
Edmonds, E. & Moss, S., « From KISS to KIDS. An 'Anti-simplistic' Modelling Approach », dans Davidsson, P., Logan, B. & Takadama, K. (ed.), *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, Springer, 2005, pp. 130-144.
Edwards, P., *A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*, Cambridge, MIT Press, 2010.
Eigen, M., « Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules », *Naturwissenschaften*, 1971, vol. 58, n. 10, pp. 465-523.
Eigen, M. & Schuster, P., *The Hypercycle : A principle of natural self-organization*, Berlin, Springer, 1979.
Elsenbroich, C., « Explanation in Agent-Based Modelling : Functions, Causality or Mechanisms ? », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2011, vol. 15, n. 3.
Emsellem, K., Liziard, S., & Scarella, F., « La géoprospective : l'émergence d'un nouveau champ de recherche ? », *L'Espace géographique*, 2012, n. 2, vol. 41, pp. 154-168.
Epstein, S., « The Construction of Lay Expertise. AIDS Activism and the Forging of Credibility the Reform of Clinical Trials », *Science, Technology, & Human Values*, 1995, vol. 20, n. 4, pp. 408-437.
Erdős, P. & Rényi, A., « On the evolution of random graphs », *Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, n. 5, 1960, pp. 17–61.
Étienne, M. (ed.), *La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*, Versailles, Éditions Quæ, 2010.
Étienne, M., « La modélisation d'accompagnement : une forme particulière de géoprospective », *L'Espace géographique*, 2012, tome 41, n. 2, pp. 128-137.
Fabiani, J.-L., « Du chaos des disciplines à la fin de l'ordre disciplinaire ? », *Pratiques*, n. 153-154, pp. 129-140.
Fairchild, G., Tasseff, B., Khalsa, H., Generous, N., Daughton, A.R., Velappan, N., Priedhorsky, R. & Deshpande, A., « Epidemiological data challenges: planning for a more robust future through data standards », 2018, eprint arXiv:1805.00445.
Farge, M., « L'approche numérique en physique », *Fundamenta Scientiae*, 1986, vol. 7, n. 2, pp. 155-175.
Favre, P., « Retour à la question de l'objet. Ou faut-il disqualifier la notion de discipline ? », *Politix*, n. 29, 1995, pp. 141-157.
Favret-Saada, J., *Les mots, la mort, les sorts*, Paris, Seul, 1977.
Feuerhahn, W., « Un tournant neurocognitiviste en phénoménologie ? Sur l'acclimatation des neurosciences dans le paysage philosophique français », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, vol. 2, n. 25, 2011, pp. 59-79.

Feuerhahn, W., « Instituer les neurosciences sociales. Quelle histoire pour un nouveau label ? », dans Ambroise, B. & Chauviré, C. (ed.), *Raisons pratiques*, n. 23, 2013, pp. 115-137.
Fine, G.A., *Authors of the Storm. Meteorologists and the Culture of Prediction*, Chicago, University Of Chicago Press, 2010.
Fisher, L., *The Perfect Swarm. The Science of Complexity in Everyday Life*, New York, Basic Books, 2009.
Fisher, G., « The Complexity of Hayek », *Synthesis*, 10.02.2012 : http://www.synthesisips.net/blog/the-complexity-of-hayek/.
Fleck, L., *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Paris, Flammarion, 2008.
Flipo F., Draetta L., Boutet I., Deltour F., *Ecologie des infrastructures numériques*, Hermès Science Publications, Paris, 2007.
Foyer, J., « Libérer et écologiser les sciences sociales », *Hermès*, 2011, vol. 2, n. 60.
Fox–Keller, E., « Organisms, Machines, and Thunderstorms : A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors », *Historical Studies in the Natural Sciences*, 2009, vol. 39, n. 1, pp. 1-31.
Foerster, H. von, *Understanding Understanding : Essays on Cybernetics and Cognition*, New York, Springer-Verlag, 2003.
Foster, J., « From simplistic to complex systems in economics », *Cambridge Journal of Economics*, 2005, n. 29, pp. 873-892.
Fraisopi, F., *La complexité et les phénomènes. Nouvelles ouvertures entre science et philosophie*, Paris, Hermann, 2012.
François, C., « Systemics and Cybernetics in a Historical Perspective », *Systems Research and Behavioral Science*, 1999, n. 16, pp. 203-219.
Frickel, S., « Building an interdiscipline : Collective action framing and the rise of genetic toxicology », *Social Problems*. 2004, vol. 51, n. 2, pp. 269-287.
Fiedler, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 2*, Amsterdam, North Holland, 2002.
Frigg, R. & Reiss, J., « The philosophy of simulation : hot new issues or same old stew ? », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 593-613.
Frodeman, R., Thompson Klein, J., Mitcham, C. & Holbrook, J.B. (ed.), *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, Oxford, Oxford University Press, 2010.
Funtowicz, S.O. & Ravetz, J.R., « Science for the post-normal age », *Futures*, vol. 25, n. 7, pp. 739-755.
Gaglio, G., *Sociologie de l'innovation*, Paris, PUF, 2011.
Galam, S., « Pas de certitude scientifique sur le climat », *Le Monde*, 07.02.07.
Galam, S., *Les scientifiques ont perdu le nord : réflexions sur le changement climatique*, Paris, Plon, 2008.
Galison, P., *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*, Chicago, London, The University of Chicago Press, 1997.
Galison, P., « Buildings and the subject of science », dans Galison, P. & Thompson, E., *The architecture of science*, Cambridge, MIT Press, 1999.
Gardner, H., *Histoire de la révolution cognitive*, Paris, Payot, 1993.
Gates, W.L., Boyle, J.S., Covey, C., Dease, C.G., Doutriaux, C.M., Drach, R.S., Fiorino, M., Gleckler, P.J., Hnilo, J.J., Marlais, S.M., Phillips, T.J., Potter, G.L., Santer, B.D., Sperber, K.R., Taylor, K.E. & Williams, D.N., « An overview of the results of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP) », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, vol. 80, n. 1, pp. 29-55.
Gaudillière, J.-P., « The Living Scientist Syndrome : Memory and History of Molecular Regulation », dans Söderqvist, T., *The Historiography of Contemporary Science and Technology*, New York, London, Routledge, 1997.
Geertz, C., *The Interpretation of cultures*, New York, Basic Books, 1973.
Gell-Mann, M., *The Quark and the Jaguar. Adventures in the Simple and the Complex*, Londres, Abacus, 1994.
George, P., « Difficultés et incertitudes de la géographie », *Annales de géographie*, 1976, vol. 85, n. 467, pp. 48-63.
Gere, C., *Digital Culture*, Londres, Reaktion Books, 2002.
German, J.D., « The Info Mesa », *New Mexico Business Journal*, September 1, 2001.
Geyer, R. & Carney, P. (ed.), *Handbook on Complexity and Public Policy*, Cheltenham, Edward Elgar, 2015.
Gibbons, M., Limoges, C., Nowotny, H., Schwartzman, S., Scott, P., & Trow, M., *The new production of knowledge : the dynamics of science and research in contemporary societies*, London, Sage, 1994.
Gieryn, T.F., « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science: Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », *American Sociological Review*, 1983, vol. 48, n. 6, pp. 781-795.
Gingras, Y., « L'institutionnalisation de la recherche en milieu universitaire et ses effets », *Sociologie et sociétés*, 1991, vol. XXIII, n. 1, pp. 41-54.
Glanville, R., « Second order cybernetics », dans Parra-Luna (ed.), « Systems Science and Cybernetics », vol. 3 de l'*Encyclopaedia of Life Support Systems*, Oxford, EoLSS Publishers, 2002.

Gleick, J., *Chaos. Making a new science*, Londres, Sphere Books, 1988.
Goldreich, O., *Computational Complexity : A Conceptual Perspective*, Cambridge, Cambridge University Press, 2008.
Goodwin, B., *How the Leopard Changed Its Spots. The Evolution of Complexity*, New York, Charles Scribner's Sons, 1994.
Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its Influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011.
Gramelsberger, G., « From Science to Computational Sciences. A Science History and Philosophy Overview », dans Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011.
Granjou, C., *Environmental Changes. The Futures of Nature*, Oxford, Elsevier, 2016.
Granjou, C. & Arpin, I., « Epistemic Commitments : Making Relevant Science in Biodiversity Studies », *Science, Technology, & Human Values*, 2015, vol. 40, n. 6, pp. 1022-1046.
Granovetter, M., « The Strength of Weak Ties: A Network Theory Revisited », *Sociological Theory*, n. 1, 1983, pp. 201-233.
Grauwin, S., Beslon, G., Fleury, E., Franceschelli, S., Robardet, C., Rouquier, J. and Jensen, P., « Complex Systems Science : Dreams of Universality, Reality of Interdisciplinarity », *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2012, vol. 63, n. 7, pp. 1327–1338.
Gribbin, J., *Deep Simplicity. Chaos, Complexity and the Emergence of Life*, Londres, Allen Lane, The Penguin Press, 2004.
Grossein, J.-P., « Leçon de méthode wébérienne », dans Weber, M., *Concepts fondamentaux de sociologie*, Paris, Gallimard, 2016.
Grüne-Yanoff, T., « Agent-Based Models as Policy Decision Tools : The Case of Smallpox Vaccination », *Simulation & Gaming*, 2011, vol. 42, n. 2, pp. 225-242.
Grusin, R., *Premediation. Affect and mediality after 9/11*, Houndmills, Palgrave Macmillan, 2010.
Grusin, R. & Bolter, J.D., *Remediation. Understanding New Media*, Cambridge, MIT Press, 1999.
Guillemot, H., « Connections between simulations and observation in climate computer modeling. Scientist's practices and 'bottom-up epistemology' lessons », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2010, n. 41, pp. 242-252.
Guiton, A., « Plus de 140 000 votes pour la consultation en ligne sur la 'République numérique' », *Libération*, 18 octobre 2015 : http://www.liberation.fr/futurs/2015/10/18/pres-de-140-000-votes-pour-la-consultation-en-ligne-sur-la-republique-numerique_1406724.
Guhathakurta, S., « Urban Modeling as Storytelling : Using Simulation Models as a Narrative », communication au *World Planning Schools Congress*, Juillet 1-15, 2001, Shanghai, PRC.
Haas, P., « Do regimes matter ? Epistemic communities and Mediterranean pollution control », *International Organization*, vol. 43, n. 3, pp. 377-403.
Hacking, I., *Representing and intervening*, Cambridge, Cambridge University Press, 1983.
Hacking, I., *Historical Ontology*, Cambridge, Londres, Harvard University Press, 2002.
Hägerstrand, T., *Innovation Diffusion as a Spatial Process*, Chicago, The University of Chicago Press, 1967.
Haken, H., *Synergetics, an Introduction : Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology*, New York, Springer, 1983.
Haken, H., *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*, Berlin, Springer, 2006.
Hammond, D., *The Science of Synthesis. Exploring the Social Implications of General System Theory*, Boulder, University of Colorado, 2003.
Hardt, M. & Negri, A., *Empire*, Paris, Exils, 2000.
Hartmanis, J. & Stearns, R.E., « On the computational complexity of algorithms », *Transactions of the American Mathematical Society*, 1965, n. 117, pp. 285-306.
Harvey, O.J., Hunt, D.E., & Schroder, H.M., *Conceptual systems and personality organization*, New York, Wiley, 1961.
Hasselblatt, B. & Katok, A., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 1A*, Amsterdam, North Holland, 2002.
Haye, Y. de la, *Dissonances. Critique de la communication*, Grenoble, La Pensée Sauvage, 1984.
Hayek, F.A. von, *Studies in philosophy, politics and economics*, Chicago, University of Chicago Press, 1967.
Hayek, F.A. von, « Prize lecture : The pretence of knowledge », *Nobelprize.org*, Nobel Media AB 2014, accès du 27 octobre 2017, disponible en ligne : http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1974/hayek-lecture.html.
Hayles, K.N., *How We Became Posthuman. Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago & London, The University of Chicago Press, 1999.

Hawe, P., Shiell, A. & Riley, T., « Complex interventions : how ‘out of control’ can a randomised controlled trial be? », *British Medical journal*, 2004, vol. 328, n. 7455, pp. 1561-1563.
Hebb, D.O., « Drives and the conceptual nervous system », *Psychological review*, 1955, n. 62, pp. 243-254.
Heims, S., « An Encounter Between Neo-mechanists and the Human Sciences », Cahier du CREA, n. 7, 1985, pp. 141-202.
Heims, S., *The Cybernetics Group*, Cambridge, MIT Press, 1991.
Helmreich, S., *Silicon Second Nature. Constructing Artificial Life in a Digital World*, Berkeley & Los Angeles, University of California Press, 1998.
Helmreich, S., « Flexible Infections : Computer Viruses, Human Bodies, Nation-States, Evolutionary Capitalism », *Science, Technology & Human Values*, 2000, vol. 25, n. 4, pp. 472-491.
Hermès, « Disciplines, instituts et interdisciplinarité au CNRS », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 188-191.
Heymann, M., Gramelsberger, G. & Mahony, M., *Cultures of Prediction in Atmospheric and Climate Science. Epistemic and Cultural Shifts in Computer-based Modelling and Simulation*, London, Routledge, 2017.
Hennion, A., « Enquêter sur nos attachements. Comment hériter de William James ? », *SociologieS*, mis en ligne le 23.02.15, consulté le 01.08.18 : http://journals.openedition.org/sociologies/4953.
Hervé, D. & Laloë, F., *Modélisation de l’environnement : entre natures et sociétés*, Versailles, Éditions Quæ, 2009.
Hillier, F.S. & Lieberman, G.J., *Introduction to Operations Research*, New York, McGraw-Hill, 2001.
Hobsbawm, E. & Ranger, T. (éd.), *The Invention of Tradition*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
Holland, J.H., *Hidden Order. How Adaptation Builds Complexity*, Cambridge, Perseus Books, 1996.
Holland, J., *Complexity : A Very Short Introduction*, Oxford, Oxford University Press, 2014.
Hooker, C.A. (ed.), *Philosophy of Complex Systems*, volume 10, dans Gabbay, D.M., Thagard, P. & Woods, J. (ed.), *Handbook of the Philosophy of Science*, Amsterdam : Elsevier / North Holland, 2011.
Hoos, I.R., *Systems Analysis in Public Policy. A Critique*, Berkeley, University of California Press, 1972.
Horgan, J., « From complexity to perplexity », *Scientific American*, 1995, vol. 272, n. 6, pp. 74-79.
Hui, Y., *On the Existence of Digital Objects*, Minneapolis & London, University of Minnesota Press, 2016.
Humphreys, P., *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*, Oxford, Oxford University Press, 2004.
Huyse, F.J., Stiefel, F.C., de Jonge, P., « Identifiers, or ‘red flags,’ of complexity and need for integrated care », *Medical Clinics of North America*, 2006, vol. 90, n. 4, pp. 703-712.
Jancovici, J.-M., « La dématérialisation de l’économie, mythe ou réalité ? », *La Jaune et la Rouge 2007 : Croissance et environnement*, rapport dans l’archive de l’Assemblée Nationale : http://www.assemblee-nationale.fr/13/cr-grenelle/jancovici-complts.pdf.
Jasanoff, S. « The idiom of co-production », dans Jasanoff, S. (ed.), *States of Knowledge. The co-production of science and social order*, London & New York, Routledge, 2004.
Jasanoff, S., (ed.), *States of Knowledge. The co-production of science and social order*, London, New York, Routledge, 2004.
Jasanoff, S., « Future Imperfect : Science, Technology, and the Imaginations of Modernity », dans Jasanoff, S. & Kim, S.-H. (ed.), *Dreamscapes of Modernity. Sociotechnical Imaginaries and the Fabrication of Power*, Chicago & London, The University of Chicago Press, 2015.
Johnson, S.B., « Three Approaches to Big Technology : Operations Research, Systems Engineering, and Project Management », *Technology and Culture*, 1997, vol. 38, n. 4, pp. 891-919.
Johnson, S., *Emergence. The connected lives of ants, brains, cities and software*, Londres, Allen Lane, The Penguin Press, 2001.
Johnson, N., *Simply Complexity. A Clear Guide to Complexity Theory*, Londres, Oneworld Publications, 2009 (première edition 2007, sous le titre *Two’s Company, Three is Complexity*).
Jollivet, M. (ed.), *Sciences de la nature, sciences de la société. Les passeurs de frontières*, Paris, CNRS éditions, 1992.
Jonge, P. de, Huyse, F.J., Stiefel, F.C., Slaets, J.P., Gans, R.O., « INTERMED–a clinical instrument for biopsychosocial assessment », *Psychosomatics*, 2001, vol. 42, n. 2, pp. 106-109.
Joly, P.-B., « On the economics of techno-scientific promises », dans Akrich, M., Barthe, Y., Muniesa, F. &
Mustar, P. (ed.), *Débordements. Mélanges offerts à Michel Callon*, Paris, Presses des Mines, 2010, pp. 203-221.
Karp, R.M., « Reducibility among combinatorial problems », dans Miller, R.E. & Thatcher, J.W. (ed.), *Complexity of Computer Computations*, New York, Plenum, 1972, pp. 85–103.
Karsenti, B. & Lemieux, C., *Socialisme et sociologie*, Paris, Editions de l’EHESS, 2017.
Katok, A. & Hasselblatt, B., *Handbook of Dynamical Systems. Volume 1B*, Amsterdam, North Holland, 2005.
Kauffman, S.A., « Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Constructed Genetic Nets », *Journal of Theoretical Biology*, vol. 22, n. 3, 1969, pp. 437-467.
Kauffman, S., *The Origins of Order. Self-Organization and Selection in Evolution*, New York, Oxford, Oxford University Press, 1993.

Kauffman, S. *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*, New York, Oxford University Press, 1995.
Kaufmann, A. & Faure, R., *Introduction to Operations Research. Volume 47 in Mathematics in Science and Engineering*, New York, Academic Press, 1968.
Kay, L.E., *The Molecular Vision of Life : Caltech, the Rockefeller Foundation, and the Rise of the New Biology*, New York, Oxford University Press, 1993.
Kelly, G.A., *The psychology of personal constructs*, New York, Norton, 1955.
Kelly, K., *Out of Control. The New Biology of Machines, Social Systems, and the Economic World*, New York, Addison-Wesley, 1994.
Kilpatrick, H.E., « Complexity, Spontaneous Ordrer, and Friedrich Hayek : Are Spontaneous Order and Complexity Essentially the Same Thing ? », *Complexity*, 2001, vol. 6, n. 3, pp. 16-20.
Kitano, H. (ed.), *Foundations of Systems Biology*, Cambridge, MIT Press, 2001.
Kitano, H., « Systems Biology : A Brief Overview », *Science*, 2002, n. 295, pp. 1662-1664.
Klein, G., « L'aventure des disciplines : trois thèses dans les études de la science contemporaine », *Cahiers Internationaux de Sociologie*, 2000, vol. 109, pp. 393-414.
Klein, J.T., « Evaluation of Interdisciplinary and Transdisciplinary Research. A Literature Review », *American Journal of Preventive Medicine*, 2008, vol. 35, n. 2, pp. 116-123.
Klein, J.T., « A Taxonomy of Interdisciplinarity », dans Frodeman, R., Klein, J.T. & Mitcham, C., (ed.), *Oxford Handbook of Interdisciplinarity*, Oxford, Oxford University Press, 2010, pp. 16-30.
Kleinpeter, É., « Taxinomie critique de l'interdisciplinarité », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 123-129.
Knorr-Cetina, K., *Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge*, Cambridge, Harvard University Press, 1999.
Knorr-Cetina, K.D., « Scientific Communities or Transepistemic Arenas of Research ? A Critique of Quasi-Economic Models of Science », *Social Studies of Science*, 1982, n. 12, pp. 101-130.
Kolmogorov, A.-N., « On Tables of Random Numbers », *Theoretical Computer Science*, 1963, n. 207, vol. 2, pp. 387-395.
Kolmogorov, A.N., « Three Approaches for Defining the Concept of Information Quantity », *Information Transmission*, vol. 1, 1965, pp. 3-11.
Koppel, M. & Atlan, H., « An Almost Machine-Independent Theory of Program-length Complexity, Sophistication and Induction », *Information Science*, n. 56, 1991, pp. 23-33.
Krieger, N., *Epidemiology and the People's Health. Theory and Context*, Oxford, Oxford University Press, 2011.
Krob, D., *CESAM: CESAMES Systems Architecting Method. A Pocket Guide*, Paris, CESAMES Groupe, 2017.
Kroger, B., *Hermann Haken : From the Laser to Synergetics. A Scientific Biography of the Early Years*, Berlin, Springer, 2015.
Krugman, P., *The Self-Organizing Economy*, Cambridge, Blackwell Publishers, 1996.
Kuhn, L., *Adventures in Complexity. For Organisations near the Edge of Chaos*, Dorset, Triarchy Press, 2009.
Kurtz, C.F. & Snowden, D.J., « The new dynamics of strategy: sense-making in a complex and complicated world », 2003, *IBM Systems Journal*, vol. 42, n. 3, pp. 462–483.
Labanca, N. (ed.), *Complex Systems and Social Pratices in Energy Transitions. Framing Energy Sustainability in the Time of Renewables*, Berlin, Springer, 2017.
Lane, D., Pumain, D., van der Leeuw, S.E. & West, G., *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*, Amsterdam, Springer, 2009.
Langton, C., « Toward Artificial Life », *Whole Earth Review*, 1988, n. 58, pp. 74-79.
Lascoumes, P., « Chapitre 7. De l'utilité des controverses socio-techniques », *Journal International de Bioéthique*, 2002, vol. 13, n. 2, pp. 68-79.
Lassègue, J., « Turing, entre le formel de Hilbert et la forme de Goethe, dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 129-142.
Latour, B., *La science en action*, Paris, La Découverte, 1989.
Latour, B., *La vie de laboratoire. La production des faits scientifiques*, Paris, La Découverte, 1996.
Latour, B., *Petites leçons de sociologie des sciences*, Paris, Seuil, 1996.
Latour, B., *Pasteur : guerre et paix des microbes.* Suivi de *Irréductions*, Paris, La Découverte, 2011.
Latour, B., *Enquête sur les modes d'existence. Une anthropologie des Modernes*, Paris, La Découverte, 2012.
Lavallée, A., « Penser l'autonomie, penser la connaissance : l'évolution d'un centre de recherche en épistémologie », *Horizons philosophiques*, vol. 2, n. 2, 1992, pp. 109-130.

Lavelle, C., Berry, H., Beslon, G., Ginelli, F., Giavitto, J.-L., Kapoula, Z., LeBivic, A., Peyrieras, N., Radulescu, O., Six, A., Thomas-Vaslin, V. & Bourgine, P., « From molecules to organisms : towards multiscale integrated models of biological systems », *Theoretical Biology Insights*, 2008, n. 1, pp. 13–22.

Law, J., « The Materials of STS », dans Hicks, D. & Beaudry, M.C., *The Oxford Handbook of Material Culture Studies*, Oxford, Oxford University Press, 2010.

Law, J. & Mo, A. (ed.), *Complexities. Social studies of knowledge practices*, Durhamn & London, Duke University Press, 2002.

Le Moigne, J.-L., *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 1990.

Leclerc, M., « La notion de discipline scientifique », *Politique*, 1989, n. 15, pp. 23-51.

Lemaine, G., Macleod, R., Mulkay, M., Weingart, P., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, The Hague, Mouton & Co. & Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1976.

Lemieux, C., *Le devoir et la grâce*, Paris, Economica, 2009.

Lemieux, C., 2011, « Jugements en action, actions en jugement. Ce que la sociologie des épreuves peut apporter à l'étude de la cognition », dans Clément, F. & Kaufmann, L., (ed.), *La sociologie cognitive*, Paris, Éditions de la MSH, pp. 249-274.

Lempel, A. & Ziv, J., « *On the Complexity of Finite Sequences* », *IEEE Trans. on Information Theory*, 1976, vol. 22, n. 1, pp. 75–81.

Lenhard, J., Küppers, G. & Shinn, T. (ed.), *Simulation. Pragmatic Construction of Reality*, Dordrecht, Springer, 2006.

Lenoir, T., *Instituting Science. The Cultural Production of Scientific Disciplines*, Stanford, Stanford University Press, 1997.

Lepetit, B., Propositions pour une pratique restreinte de l'interdisciplinarité, *Revue de synthèse*, 1990, vol. 111, pp. 331-338.

Le Roux, R., *La cybernétique en France (1948-1970) : contribution à l'étude de la circulation interdisciplinaire des modèles et des instruments conceptuels et cognitifs*, Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 2010.

Levin, L.A., « Универсальные задачи перебора », Проблемы передачи информации, 1973, vol. 9, n. 3, p. 115–116.

Levin, S., *Fragile Dominion. Complexity and the Commons*, Reading, Perseus Books, 1999.

Lévy, J.-C.S. (ed.), *Complexité et désordre. Éléments de réflexion*, Les Ulis, EDP Sciences, 2015.

Leykum, L.K., Pugh, J., Lawrence, V., Parchman, M., Noël, P.H., Cornell, J. & Mcdaniel, R.R.J., « Organizational interventions employing principles of complexity science have improved outcomes for patients with type II diabetes », *Implementation Science*, 2007, vol. 2, n. 1.

Lewin, R., *Complexity. Life at the Edge of Chaos*, New York, Macmillan Publishing Company, 1992.

Li Vigni, F., *Introduzione al pensiero complesso di Edgar Morin*, mémoire de licence en Philosophie de la connaissance et de la communication, Università degli Studi di Palermo, 2009.

Li Vigni, F., *Les Théories de la complexité (1970-2010). Une sociohistoire d'un domaine émergent*, mémoire de master en sociologie générale, EHESS, soutenu en juin 2014.

Li Vigni, F., « Les théories de la complexité : des points de repère », *Socio-informatique et argumentation*, 23/03/2015 : http://socioargu.hypotheses.org/5004.

Li Vigni, F., « La place du désordre dans les différentes traditions des théories de la complexité », dans Lévy, J.-C. (ed.), *Complexité et désordre*, Éditions matériologiques, Paris, 2018.

Lloyd, S., *Programming the Universe. A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*, New York, Vintage Boos, 2006.

Longo, G., Miquel, P.-A., Sonnenschein, C. & Soto, A.M., « Is information a proper observable for biological organization ? », *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2012, n. 109, pp. 108-114.

Longo, G., « Des sciences exactes aux phénomènes du vivant, à partir de Schrödinger : mathématiques, programme et modèles », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 81-109.

Lorenz, C., « If You're So Smart, Why Are You under Surveillance? Universities, Neoliberalism, and New Public Management », *Critical Inquiry*, 2012, n. 38, pp. 599-629.

Luhmann, N., *Essays on self-reference*, New York, Columbia University Press, 1990.

Luhmann, N., *Introduction to systems theory*, Cambridge, Polity Press, 2012.

MacKenzie, D., « The big, bad wolf and the rational market : portfolio insurance, the 1987 crash and the performativity of economics », *Economy and Society*, 2004, vol. 33, n. 3, pp. 303-334.

Marc, E. & Picard, D., *L'École de Palo Alto. Un nouveau regard sur les relations humaines*, Paris, Retz, 2000.

Marcovich, A. & Shinn, T., « Where is disciplinarity going ? Meeting on the borderland », *Social Science Information*, 2011, vol. 50, n. 3-4, pp. 582-606.

Markose, S.M., « Computability and evolutionary complexity : markets as complex adaptive systems », *The Economic Journal*, 2005, n. 115, pp. 159-192.

Martin, E., « The Egg and the Sperm : How Science Has Constructed a Romance Based on Stereotypical Male-Female Roles », *Signs*, 1991, vol. 16, n. 3, pp. 485-501.

Martin, C.M. & Sturmberg, J.P., « Perturbing ongoing conversations about systems and complexity in health services and systems », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 549-552.

Matarasso, P., « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrée : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission », dans Dahan Dalmedico, A. (ed.), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007.

Mathieu, N. & Schmid, A.-F. (ed.), *Modélisation et interdisciplinarité. Six disciplines en quête d'épistémologie*, Versailles, Quæ, 2014.

Maturana, H.R. & Varela, F.J., *Autopoiesis and cognition. The realization of the living*, Dordrecht, Reidel, 1980.

Mayer-Schönberger, V. & Ramge, T., *Reinventing Capitalism in the Age of Big Data*, New York, Basic Books, 2018.

McCabe, T.J., « A Complexity Measure », *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1976, vol. 2, n. 4, pp. 308–320.

Meadows, D.H, Meadows, D.L., Randers, J. & Behrens III, W.W., *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, New York, Universe Books, 1972.

Medical Research Council, *A Framework for Development and Evaluation of RCTs for Complex Interventions to Improve Health*, London, Medical Research Council, 2000.

Medical Research Council, *Developing and evaluating complex interventions : new guidance*, London, Medical Research Council, 2006.

Merton, R.K., « The Normative Structure of Science », dans Merton, R.K., *The Sociology of Science. Theoretical and Empirical Investigations*, Chicago, University of Chicago Press, 1973.

Meynaud, J., *Introduction à la science politique*, Paris, Armand Colin, 1959.

Miles, A., « Complexity in medicine and healthcare : people and systems, theory and practice », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 409-410.

Miller, P. & O'Leary, T., « Mediating instruments and making markets : capital budgeting, science and the economy », *Accounting, Organization and Society*, 2007, n. 32, pp. 701-734.

Mitchell, T., « Can the mosquito speak? », dans Mitchell, T., *Rule of Experts : Egypt, Techno-Politics, Modernity*, Oakland, University of California Press, 2002, pp. 19-53.

Mitchell, S.D., *Biological Complexity and Integrative Pluralism*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.

Mitchell, M., *Complexity. A Guided Tour*, Oxford, New York, Oxford University Press, 2009.

Mniszewski, S., Del Valle, S., Stroud, P., Riese, J., Sydoriak, S., « EpiSimS simulation of a multi-component strategy for pandemic influenza », *Proceedings of the 2008 Spring simulation multiconference*, 2008, pp. 556–563.

Monneau, E. & Lebaron, F., « L'émergence de la neuroéconomie : Genèse et structure d'un sous-champ disciplinaire », *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 2011/2 (n° 25), pp. 203-238.

Moore, C. & Mertens, S., *The Nature of Computation*, Cambridge, Oxford University Press, 2011.

Moore, K., Kleinman, D.L., Hess, D. & Frickel, S., « Science and neoliberal globalization : a political sociological approach », *Theory and Society*, vol. 40, n. 5, pp. 505-532.

Monteil, L. & Romerio, A., « Des disciplines aux 'studies'. Savoirs, trajectoires, politiques », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2017, vol. 11, n. 3, pp. 231-244.

Moran, K.R., Fairchild, G., Generous, N., Hickmann, K., Osthus, D., Priedhorsky, R., Hyman, J. & Del Valle, S.Y., « Epidemic Forecasting is Messier Than Weather Forecasting : The Role of Human Behavior and Internet Data Streams in Epidemic Forecast », *The Journal of Infectious Diseases*, 2016, vol. 214, n. 4, pp. 404–440.

Morange, M., *Une histoire de la biologie*, Paris, Seuil, 2016.

Morgan, M.S., *The World in the Model. How Economist Work and Think*, New York, Cambridge University Press, 2012.
Morin, E., *La Méthode 1. La Nature de la Nature*, Paris, Seuil, 1977.
Morin, E., *La Méthode 2. La Vie de la Vie*, Paris, Seuil, 1980.
Morin, E., *Introduction à la pensée complexe*, Paris, Seuil, 1990.
Morin, E., « Sur l'interdisciplinarité », *Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études Transdisciplinaires*, n. 2, 1994.
Morin, E., *La tête bien faite*, Seuil, Paris, 1999.
Morin, E., « Complexité restreinte, complexité générale ». *Colloque « Intelligence de la complexité : épistémologie et pragmatique »*, *Cerisy-la-Salle*, 2005, disponible en ligne : http://www.learndev.org/dl/BtSM2007/EdgarMorin-FR.pdf.
Morin, E., *La Méthode*, Paris, Seuil, 1977-2004, 6 vol.
Mulkay, M.J. & Edge, D.O., « Cognitive, Technical and Social Factors in the Growth of Radio Astronomy », dans Lemaine, G., Macleod, R., Mulkay, M., Weingart, P., *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, The Hague, Mouton & Co. & Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1976.
Mullins, N.C., « The development of a scientific specialty : The phage group and the origins of molecular biology », *Minerva*, 1972, vol. 10, n. 1, pp. 51-52.
Nading, A.M., « The lively ethics of global health GMOs : The case of the Oxitec mosquito », *BioSocieties*, 2015, vol. 10, n. 1, pp. 24-47.
Nef, F., *Qu'est-ce que la métaphysique ?*, Paris, Gallimard, 2004.
Nemo, P. & Petitot, J., *Histoire du libéralisme en Europe*, Paris, PUF, 2006.
Newell, A., Shaw, J.C., & Simon, H.A., « Elements of a theory of human problem solving », *Psychological review*, 1958, n. 65, pp. 151-166.
Newman, M.E.J., Strogatz, S.H. & Watts, D.J., « Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications », *Physical Review E*, n. 64, 2001.
Nicolescu, B., « The transdisciplinary evolution of learning », *Centre International de Recherches et d'Études Transdisciplinaires, Proceedings of the International Congress on What University for Tomorrow? Towards a Transdisciplinary Evolution of the University*, Locarno, 30 April-2 May 1997, pp. 1-11. Disponible en ligne : http://www.learndev.org/dl/nicolescu_f.pdf.
Norton, S. & Suppe, F., « Why Atmospheric Modeling is Good Science », dans Miller, C. & Edwards, P. (ed.), *Changing the Atmosphere: Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge, MIT Press, 2000.
Nussbaum, M.C., *Les émotions démocratiques. Comment former le citoyen du XXIe siècle*, Paris, Flammarion, 2011.
Ogien, A., *Désacraliser le chiffre dans l'évaluation du secteur public*, Versailles, Quæ, 2013.
Opitz, S., « Simulating the world : The digital enactment of pandemics as a mode of global self-observation », *European Journal of Social Theory*, 2017, vol. 20, n. 3.
Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K., « Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences », *Science*, New Series, 1994, vol. 263, n. 5147, pp. 641-646.
Oustinoff, M., « (In)discipline et interdisciplinarité: des mots aux choses », *Hermès*, 2013, vol.3, n.67, pp. 21-24.
Packard, N.H., « Adaptation toward the edge of chaos », dans Kelso, J.A.S., Mandell, A.J. & Shlesinger, M.F., *Dynamic patterns in complex systems. Proceedings of the Conference in Honor of Hermann Haken on the Occasion of His 60th Birthday*, 1988, pp. 293-301.
Packard, N.H., *Adaptation Toward the Edge of Chaos*, Urbana-Champaign, University of Illinois Press, 1988.
Pagels, H.R., *The Dreams of Reason. The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity*, New York, Bantam Books, 1989.
Palmade, G., *Interdisciplinarité et idéologies*, Paris, Economica, 1999.
Papadimitriou, C., *Computational Complexity*, New York, Addison-Wesley, 1994.
Pastor-Satorras, R. & Vespignani, A., « Epidemic dynamics and endemic states in complex networks », *Physical Review E*, 2001, vol. 63, n. 6.
Pearce, D., « Complexity Theory and Economics », *Agenda*, 1994, vol. 1, n. 1, pp. 101-110.
Peschard, I., « Les simulations sont-elles de réels substituts de l'expérience ? », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 143-167.
Pestre, D., « Pour une histoire sociale et culturelle des sciences. Nouvelles définitions, nouveaux objets, nouvelles pratiques », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 1995, n. 3, pp. 487-522.
Pestre, D. *Science, argent et politique*, Versailles, Quæ, 2003.
Pestre, D., « L'évolution des champs de savoir, interdisciplinarité et noyaux durs. Communication au Conseil scientifique du CNRS (13 janvier 2002) », *Natures Sciences Sociétés*, 2004, vol. 12, n. 2, pp. 191-196.

Pestre, D., « L'analyse de controverses dans l'étude des sciences depuis trente ans. entre outil méthodologique, garantie de neutralité axiologique et politique », *Mil neuf cent*, 2007, vol. 1, n. 25, pp. 29-43.
Pestre, D., « Épistémologie et politique des *science and transnational studies* », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2012, vol. 6, n. 3.
Pestre, D. (ed.), *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*, Paris, La Découverte, 2014.
Petitot, J., Varela, F., Pachoud, B. & Roy, J.-M., *Naturalizing phenomenology. Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science*, Stanford, Stanford University Press, 2000.
Petitot, J., « Les modèles morphogénétiques de René Thom », dans Bourgine, P. & Lesne, A., *Morphogenèse. L'origine des formes*, Paris, Belin, 2006, pp. 288-297.
Petitot, J., « Complex Methodological Individualism », *Cosmos + Taxis*, 2016, vol. 3, n. 2+3, pp. 27-37.
Peyriéras, N., « La reconstruction phénoménologique est-elle une étape utile voire nécessaire d'une reconstruction théorique en biologie? », Résumé de l'exposé donné au Séminaire de Biologie Théorique du CREA, 14 décembre 2010, en ligne : https://biotheo.wordpress.com/2010/12/10/nadine-peyrieras/.
Pias, C., « On the Epistemology of Computer Simulation », *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung*, 2011, vol. 2011, n. 1, pp. 29-54.
Pinch, T., « Scientific Controversies », dans Wright, J.D. (ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, Elsevier, 2015, pp. 281-286.
Pines, D. (ed.), *Emerging Syntheses in Science. Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico. Volume I*, New York, Perseus Books, 1988.
Pomian, K. (ed.), *La querelle du déterminisme*, Paris, Gallimard, 1990.
Pourbohloula, B. & Kieny, M.-P., « Complex systems analysis : towards holistic approaches to health systems planning and policy », *Bulletin of World Health Organization*, 2011, n. 89.
Pouvreau, D., *Une histoire de la « systémologie générale » de Ludwig von Bertalanffy. Généalogie, genèse, actualisation et postérité d'un projet herméneutique*, Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 2013.
Plsek, P.E., Greenhalgh, T., « Complexity science : The challenge of complexity in health care », *British medical journal*, 2001, vol. 323, pp. 625-628.
Presse Ile-de-France, « Ouverture d'un nouveau lieu de science : L'Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France », 10 mars 2014.
Prud'homme, J. & Gingras, Y., « Les collaborations interdisciplinaires : raisons et obstacles », *Actes de la recherche en sciences sociales*, 2015, vol. 5, n. 210, pp. 40-49.
Pumain, D., *La dynamique des villes*, Paris, Economica, 1982.
Pumain, D., « Pour une théorie évolutive des villes », *Espace géographique*, 1997, vol. 26, n. 2.
Pumain, D. & Sanders, L., 2013, « Theoretical principles in inter-urban simulation models : a comparison », *Environment and Planning A*, n. 45, pp. 2243-2260.
Pumain, D., Swerts, E., Cottineau, C., Vacchiani-Marcuzzo, C., Ignazzi, A., Bretagnolle, A., Delisle, F., Cura, R., Lizzi, L. & Baffi, S., « Multilevel comparison of large urban systems », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 706, mis en ligne le 17 janvier 2015, consulté le 29 mai 2018. URL : http://journals.openedition.org/cybergeo/26730.
Quade, E.S. & Boucher, W.I. (ed.), *Systems Analysis and Policy Planning*, New York, American Elsevier, 1968.
Quigley, W., « Why Santa Fe's 'Info Mesa' stalled », *Albuquerque Journal*, Sunday, December 6th, 2015, https://www.abqjournal.com/686738/why-sfs-info-mesa-didnt-become-a-silicon-valley.html.
Rajan, K.S., *Biocapital. The Constitution of Postgenomic Life*, Durham & London, Duke University Press, 2006.
Regis, E., « Greetings from Info Mesa », *Wired Magazine*, 06.01.2000, https://www.wired.com/2000/06/infomesa/.
Regis, E., *The Info Mesa : Science, Business, and New Age Alchemy on the Santa Fe Plateau*, New York, WW Norton & Co, 2003.
Rescher, N., *Complexity: a philosophical overview*, New Brunswick, London, Transaction Publishers, 1998.
Rey-Coyrehourcq, S., *Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles de simulation en géographie*, 2015, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne.
Rhoades, G. & Slaughter, S., « Academic Capitalism in the New Economy. Challenges and Choices », *American Academic*, 2004, vol. 1, n. 1, pp. 37-60.
Richards, D.A. & Hallberg, I.R., *Complex interventions in health. An overview of research methods*, London and New York, Routledge, 2015.
Ricœur, P., *L'idéologie et l'utopie*, Paris, Seuil, 1997.
Roberts, E.B. (ed.), *Managerial Applications of System Dynamics*, Cambridge, MIT Press, 1978.
Robson, B.T., *Urban growth : an approach*, Londres, Metheun & Co. Ltd, 1973.
Rosanvallon, P., *L'Âge de l'autogestion*, Paris, Seuil, 1976.
Rose, H., Rose, S. & Hanmer, J., Enzensberger, H.-M., Franck, R., Lévy-Leblond, J.-M. & Stéhelin, L., *L'idéologie de/dans la science*, Paris, Seuil, 1977.

Rosen, R., *Essays on Life Itself*, New York, Columbia University Press, 2000.
Rosenblatt, F., « The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain », *Psychological review*, 1958, n. 65, pp. 386-408.
Rosnay, J. de, *Le Macroscope*, Paris, Seuil, 1975.
Rosnay, J. de, *L'homme symbiotique*, Paris, Seuil, 1995.
Rosser, J.B. (ed.), *Handbook of Research of Complexity*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, 2009.
Rumpala, Y., « De l'objectivation des risques à la régulation des comportements. L'information sur la qualité de l'air comme instrument d'action publique », *Réseaux*, 2004, vol. 4, n. 126, pp. 177-212.
Ruphy, S., « Simulations numériques de phénomènes complexes : un nouveau style de raisonnement scientifique ? », dans Varenne, F., Silberstein, M., Dutreuil, S. & Huneman, P. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 2 : Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2014, pp. 49-66.
Sadin, É., *La vie algorithmique. Critique de la raison numérique*, Le Kremlin Bicêtre, L'Echappée éditions, 2015.
Sadin, É., *La siliconisation du monde. L'irrésistible expansion du libéralisme numérique*, Le Kremlin Bicêtre, L'Echappée éditions, 2016.
Sage, A. (ed.), *Handbook of Systems Engineering and Management*, New York, Wiley, 1999.
Salathé, M., Bengtsson, L., Bodnar, T.J., Brewer, D.D., Brownstein, J.S., Buckee, C., Campbell, E.M., Cattuto, C., Khandelwal, S., Mabry, P.L. & Vespignani, A., « Digital Epidemiology », *PLoS Computational Biology*, 2012, vol. 8, n. 7.
Sanayei, A., Zelinka, I. & Rössler, O.E. (ed.), *ISCS 2013 : Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, Berlin, Springer, 2014.
Sanayei, A., Rössler, O.E. & Zelinka, I. (ed.), *ISCS 2014 : Interdisciplinary Symposium on Complex Systems*, Berlin, Springer, 2015.
Sanders, L., Favaro, J.M., Glisse, B., Mathian, H. & Pumain, D., « Intelligence artificielle et agents collectives : le modèle Eurosim », *Cybergeo, European Journal of Geography*, 2007, n. 392, pp. 1-16.
Schaefer, F.K., « Exceptionalism in Geography : A Methodological Examination », *Annals of the Association of American Geographers*, 1953, vol. 43, n. 3, pp. 226-249.
Schiller, D., *Digital Capitalism. Networking the Global Market System*, Cambridge & Londres, MIT Press, 1999.
Schmitt, C., *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet*, 2014, Thèse doctorale en Géographie, Université Panthéon-Sorbonne.
Schmitt, C., Rey-Coyrehourcq, S., Reuillon, R. & Pumain, D., « Half a billion simulations : evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model », *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2015, vol. 42.
Schroder, H., Driver, M. et Streufert, S., *Human Information Processing*, New York, Chicago, San Francisco, Toronto, London, Holt, Rinehart and Winson, 1967.
Schroder, H.M. & Suedfeld, P., *Personality theory and information processing*, New York, Ronald, 1971.
Schut, P.-O. et Delalandre, M., « L'échec d'une discipline : montée et déclin de la spéléologie en France (1888-1978), *Revue d'histoire des sciences*, vol. 1, tome 68, 2015, pp. 81-107.
Schweber, S. & Wächter, M., « Complex Systems, Modelling and Simulation », *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2000, vol. 31, n. 4, pp. 583-609.
Shackley, S., « Epistemic Lifestyles in Climate Change Modeling », dans Miller, C.A. & Edwards, P.N., *Changing the Atmosphere. Expert Knowledge and Environmental Governance*, Cambridge, London, The MIT Press, 2001, pp. 107-133.
Sedooka, A., Steffen, G., Paulsen, T. & Darbellay, F., « Paradoxe identitaire et interdisciplinarité: un regard sur les identités disciplinaires des chercheurs », *Natures Sciences Sociétés*, 2015, vol. 23, n. 4.
Selin, C., « Expectations and the Emergence of Nanotechnology », *Science, Technology, & Human Values*, 2007, vol. 32, n. 2, pp. 196-220.
Shapin, S., « Cordelia's Love : Credibility and the Social Studies of Science », *Perspectives on Science*, n. 3, pp. 255-275.
Silverman, R., *Complex Analysis with Applications*, New York, Dover Publications, 1974.
Simon, H., « The Architecture of Complexity », *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106, n. 6, 1962, pp. 467-482.
Sismondo, S., « Models, simulations, and their objects », *Science in Context*, 1999, vol. 12, n. 2, pp. 247-260.
Sismondo, S., « Ontological turns, turnoffs and roundabouts », *Social Studies of Science*, 2015, vol. 45, n. 3, pp. 441-448.
Sismondo, S., « Simulation as a New Style of Research : Iteration, Integration, and Instability », dans Gramelsberger, G. (ed.), *From Science to Computational Sciences. Studies in the History of Computing and its influence on Today's Sciences*, Zürich, Diaphanes, 2011.

Shapin, S. & Schaffer, S., *Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*, Princeton, Princeton University Press, 1985.
Shiell, A., Hawe, P., Gold, L., « Complex interventions or complex systems ? Implications for health economic evaluation », *British Medical journal*, 2008, vol. 336, n. 1281.
Skinner, Q., *La vérité et l'historien*, Paris, Éditions de l'EHESS, 2012.
Stearns, R.E., « Juris Hartmanis : The Beginnings of Computational Complexity », dans Selman, A.L. (ed.), *Complexity Theory Retrospective*, New York, Springer, 1990.
Stein, E.M. & Shakarchi, R., *Complex Analysis*, Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2003.
Stengers, I., « Les généalogies de l'auto-organisation », Cahier du CREA, n. 8, 1985, pp. 7-104.
Stengers, I. (ed.), *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*, Paris, Seuil, 1987.
Stengers, I. & Bensaude-Vincent, B., *100 mots pour commencer à penser les sciences*, Les Empêcheurs de penser en rond, Paris, 2003.
Stengers, I. & Lissack, M., « The challenge of complexity : Unfolding the ethics of science. In memoriam Ilya Prigogine », *Emergence: Complexity and Organization*, 2004, vol. 6, n. 1-2.
Stiegler, B. (ed.), *Digital studies. Organologie des savoirs et technologies de la connaissance*, Limoges, FYP Editions, 2014.
Stromboni, C., « La Cour des comptes appelle à sortir de l'impasse à Saclay », *Le Monde*, 08.02.2017 : http://mobile.lemonde.fr/campus/article/2017/02/08/la-cour-des-comptes-appelle-a-sortir-de-l-impasse-a-saclay_5076291_4401467.html.
Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., « Complexity and health – yesterday's traditions, tomorrow's future », *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 2009, vol. 15, n. 3, pp. 543-548.
Sturmberg, J.P., & Martin, C.M., (ed.) *Handbook of Systems and Complexity in Health*, New York, Springer, 2013.
Sturmberg, J.P., (ed.), *The Value of Systems and Complexity Sciences for Healthcare*, Berlin, Springer, 2016.
Suedfeld, P., « The cognitive processing of politics and politicians: archival studies of conceptual and integrative complexity », *Journal of personality*, 2010, vol. 78, n. 6, pp. 1669-1702.
Sugimoto, C.R. & Weingart, S., « The Kaleidoscope of Disciplinarity », *Journal of Documentation*, 2015, vol. 71, n. 4, pp. 775-794.
Supiot, A., *La Gouvernance par les nombres. Cours au Collège de France (2012-2014)*, Paris, Fayard, 2015.
Tainter, J., *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
Taha, H.A., *Operations Research. An Introduction*, Upper Saddle River, Pearson, 2007.
Taylor, M.C., *The Moment of Complexity. Emerging Network Culture*, Chicago, University of Chicago Press, 2003.
Taylor, P.J. & Buttel, F.H., « How do we Know we have Global Environmental Problems ? Science and the Globalization of Environmental Discourse », *Geoforum*, 1992, vol. 23, n. 3, pp. 405-416.
Telfener, U. & Casadio, L., *Sistemica. Voci e percorsi nella complessità*, Torino, Bollati Boringhieri, 2003.
Thomas, W., « The Heuristics of War : Scientific Method and the Founders of Operations Research », *The British Journal for the History of Science*, 2007, vol. 40, n. 2, pp. 251-274.
Thompson, P., *The voice of the past : oral history*, Oxford, Oxford University Press, 1978.
Trabal, P., Collinet, C. & Terral, P., « Faire preuve d'interdisciplinarité. Un mot d'ordre, ses interprétations et ses ajustements », *Terrains & Travaux*, 2017, vol. 1, n. 30, pp. 209-229.
Tucker, W., « Complex questions : the new science of spontaneous order », *Reason*, 1 January, 1996.
Turing, A., « The Chemical Basis of Morphogenesis », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 237, n. 641, 1952, pp. 37-72.
Turner, F., *From counterculture to cyberculture. Stewart Brand, the Whole Earth Network, and the rise of digital utopianism*, Chicago, University of Chicago Press, 2006.
Urry, J. (éd.), « Special Issue on Complexity », *Theory, Culture & Society*, 2005, vol. 22, n. 5, pp. 1-274.
Urry, J., « Complexity », *Theory, Culture & Society*, 2006, vol. 23, n. 2-3, pp. 111-117.
Valade, B., « La traverse des disciplines : passages et passeurs », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 67, pp. 80-89.
Valdano, E., Poletto, C., Giovannini, A., Palma, D., Savini, L. & Colizza, V., « Predicting Epidemic Risk from Past Temporal Contact Data », *PLoS Computational Biology*, 2015, vol. 11, n. 3.
Van den Broeck, W., Gioannini, C., Gonçalves, B., Quaggiotto, M., Colizza, V. & Vespignani, A., « The GLEaMviz computational tool, a publicly available software to explore realistic epidemic spreading scenarios at the global scale », *BMC Infectious Diseases*, 2011, vol. 11, n. 37.
Van Heur, B., Leydesdorff, L. & Wyatt, S., « Turning to ontology in STS ? Turning to STS through 'ontology' », *Social Studies of Science*, 2013, vol. 43, n. 3, pp. 341-362.
Van Lente, H., *Promising Technology. The Dynamics of Expectations in Technological Developments*, Thèse doctorale, Université de Twente, 1993.
Varela, F., *Invitation aux sciences cognitives*, Paris, Seuil, 1996.

Varenne, F., « What does a computer simulation prove ? The case of plant modeling at CIRAD (France) », dans Giambasi, N. & Frydman, C., *Simulation in Industry. Proceedings of the 13th European Simulation Symposium*, Ghent, SCS Europe Bvba, 2001, pp. 549-554.
Varenne, F., « Models and Simulations in the Historical Emergence of the Science of Complexity », dans Aziz-Alaoui, M.A. & Bertelle, C. (éd.), *From System Complexity to Emergent Properties. Understanding Complex Systems*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009.
Varenne, F., « La reconstruction phénoménologique par simulation : vers une épaisseur du *simulat* », dans Parrocchia, D. et Tirloni, V., *Formes, systèmes et milieux techniques*, Lyon, Jacques André, 2012.
Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 1, vol. 1: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2013.
Varenne, F., « Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines », dans Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, tome 1, vol. 1, Paris, Éditions Matériologiques, 2013, pp. 9-47.
Varenne, F. & Silberstein, M. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 1, vol. 2: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2013.
Varenne, F., Silberstein, M., Dutreuil, S. & Huneman, P. (ed.), *Modéliser & simuler – Tome 2: Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Paris, Editions Matériologiques, 2014.
Varenne, F., *Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie*, Paris, Éditions Matériologiques, 2017.
Vaughn, K.I., « Hayek's theory of the market order as an instance of the theory of complex, adaptive systems », 1999, vol. 9, n. 2-3, pp. 241-256.
Vehlken, S., « Contagious Agents. Epidemics, Networks, Computer Simulation », dans Borch, C. (ed.), *Imitation, Contagion, Suggestion*, Londres, Routledge, 2018 (en cours d'impression).
Vermeulen, N., « Growing a Cell in Silico: On How the Creation of a Bio-object Transforms the Organisation of Science », dans Vermeulen, N., Tamminen, S. & Webster, A., *Bio-Objects. Life in the 21st Century*, Farnham, Burlington, Ashgate, 2012.
Verney-Caillat, S., « On ne peut pas prévoir comment va évoluer le climat », entretien avec Serge Galam, *Rue89*, 07.11.09.
Vieille-Blanchard, E., « Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles », dans Dahan Dalmedico, A. (ed.), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte, 2007.
Villalba, J. de, *Epidemiologia Espanola, o historia cronologica de las pestes, contagios, epidemias y epizootias que han acaecido en Espana desde la venida de los Cartagineses hasta el ano 1801. Con noticia de algunas otras enfermedades de esta especie que han sufrido los Espanoles en otros reynos, y do los autores nacionales que han escrito sobre esta materia, asi en la peninsula como fuero de ella*, Madrid, en la imprenta de Don Fermin Villapando, 1803.
Villoutreix, P., Delile, J., Rizzi, B., Duloquin, L., Savy, T., Bourgine, P., Doursat, R. et Peyriéras, N., « An integrated modelling framework from cells to organism based on a cohort of digital embryos », *Nature Scientific Reports*, 2016, n. 6 : 37438, doi : 10.1038/srep37438.
Vinck, D. (ed.), *Pratiques de l'interdisciplinarité : Mutations des sciences, de l'industrie et de l'enseignement*, Grenoble, PUG, 2001.
Voinov, A. & Bousquet, F., « Modelling with Stakeholders », *Environmental Modelling & Software*, 2010, vol. 25, n. 11, pp. 1268-1281.
Vriend, N.J., « Was Hayek an ACE ? », *Queen Mary and Westfield College Working Paper No. 403*, 1999 : https://ssrn.com/abstract=185650.
Waldrop, M.M., *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*, New York, Simon & Schuster Paperbacks, 1992.
Weaver, W., « Science and Complexity », *American Scientist*, n. 36, 1948, pp. 536-544.
Weber, M., *Essais sur la théorie de la science*, Paris, Plon, 1965.
Webster, F., *Theories of the information society*, Londres & New York, Routledge, 2006.
Weinberg, A.M., « Impact of Large-Scale Science on the United States », *Science*, 1961, vol. 134, n. 3473, pp. 161-164.
Weingart, P. & Stehr, N., *Practising interdisciplinarity*, Toronto, Buffalo, London, University of Toronto Press, 2000.
Weisbuch, G. & Zwirn, H. (ed.), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*, Paris, Vuibert, 2010.
West, G., *Scale. The universal laws of life and death in organisms, cities and companies*, Londres, Weidenfeld & Nicolson, 2017.
Williams, L., *Modeling, Building, Writing : A History of Nonlinear Dynamics and Complex Systems*, Thèse de Doctorat, Harvard University, 2012.

Wigner, E.P., « The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. Richard courant lecture in mathematical sciences delivered at New York University, May 11, 1959 », *Communications on pure and applied mathematics*, 1960, vol. XIII, n. 1, pp. 1-14.
Wilson, A.G., « Theoretical Geography : Some Speculation », *Transactions of the Institute of British Geographers*, 1972, n. 57, pp. 31-44.
Wilson, A.G., *Catastrophe theory and bifurcation : application to urban and regional systems*, Berkeley, University of California Press, 1981.
Wimsatt, W., *Re-Engineering Philosophy for Limited Beings*, Cambridge & London, Harvard University Press, 2007.
Winner, L., « Do Artifacts Have Politics? », *Daedalus*, 1980, vol. 109, n. 1, pp. 121-136.
Winsberg, E., « Simulated Experiments : Methodology for a Virtual World », *Philosophy of Science*, 2003, p. 70, pp. 105-125.
Winsberg, E., « A Tale of Two Methods », *Synthese*, 2009, n. 169, pp. 575-592.
Wise, N. (ed.), *Growing explanations*, Durham & London, Duke University Press, 2004.
Wolfram, S., *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002.
Wolfram, S., « It's Been 10 Years: What's Happened with *A New Kind of Science*? », *Stephen Wolfram blog*, May 7, 2012, disponible en ligne : http://blog.stephenwolfram.com/2012/05/its-been-10-years-whats-happened-with-a-new-kind-of-science/.
Woolgar, S. & Lezaun, J., « The wrong bin bag : A turn to ontology in science and technology studies ? », *Social Studies of Science*, 2013, vol. 43, n. 3, pp. 321-340.
Wolton, D., « Conclusion. Pour un manifeste de l'indiscipline », *Hermès*, 2013, vol. 3, n. 64, pp. 210-222.
Wyatt, S., « Technological Determinism is Dead ; Long Live Technological Determinism », dans Hackett, E.J., Amsterdamska, O., Lynch, M. & Wajcam, J., *The Handbook of Science and Technology Studies*, Cambridge & London, MIT Press, 2008.
Yao, A.C., « Some Complexity Questions Related to Distributed Computing », *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on Theory of Computing STOC*, 1979, n. 14, pp. 209–213.
Zellmer, A.J., Allen, T.F.H. & Kesseboehmer, K., « The nature of ecological complexity : A protocol for building the narrative », *Ecological Complexity*, 2006, n. 3, pp. 171-182.
Žižek, S., « Have Michael Hardt and Antonio Negri Rewritten the Communist Manifesto for the Twenty-First Century ? », *Rethinking Marxism*, 2001, vol. 13, n. 3-4, pp. 190-198.

Entretiens

Les entretiens soulignés ont été utilisés et mentionnés en bas de page dans cette thèse. Les autres n'ont pas été cités au cours du texte, mais ont tout de même contribué à fournir et appuyer les thèses défendues ici.

1. Entretien avec David Ackley 27.09.16.
2. Entretien avec Margaret Alexander, 20.09.16.
3. Entretien avec Jean-Paul Allouche, 29.03.16.
4. Entretien avec Henri Atlan, 16.12.12.
5. Entretien avec Henri Atlan, 17.05.13.
6. Entretien avec Brian Arthur, 06.12.16
7. Entretien avec Brian Arthur, 25.11.16.
8. Entretien avec Marcella Austin, 26.09.16.
9. Entretien avec Robert Axtell, 25.06.16.
10. Entretien avec Arnaud Banos, 01.03.17.
11. Entretien avec Arnaud Banos, 10.03.17.
12. Entretien avec Arnaud Banos, 25.04.17.
13. Entretien avec Albert László-Barabási, 12.09.16.
14. Entretien avec Yaneer Bar-Yam, 13.09.16.
15. Entretien avec Michael Batty, 30.07.18.
16. Entretien avec Elise Beck, 17.09.15.
17. Entretien avec Clovis Beraud, 23.04.15.
18. Entretien avec Johannes Berg, 18.11.15.
19. Entretien avec Hugues Bersini, 25.05.16.

20. Entretien avec Eric Bertin, 14.09.15.
21. Entretien avec Tiziana Bertoletti, 16.02.17.
22. Entretien avec Guillaume Beslon, 15.09.15.
23. Entretien avec Jean-Michel Besnier, 21.04.16.
24. Entretien avec Luis Bettencourt, 05.03.15.
25. Entretien avec Luis Bettencourt, 28.09.16.
26. Entretien avec Paul Bourgine, 24.05.13.
27. Entretien avec Paul Bourgine, 27.05.13.
28. Entretien avec Paul Bourgine, 29.05.13.
29. Entretien avec Paul Bourgine, 27.03.17.
30. Entretien avec Mathieu Bouyrie, 24.04.15.
31. Entretien avec Adeline Boyreau, 23.04.15.
32. Entretien avec Patrisia Brunello, 22.09.16.
33. Interview Ronda Butler-Villa, 03.11.16.
34. Entretien avec Timoteo Carletti, 15.03.16.
35. Entretien avec Giulia Carra, 07.07.18.
36. Entretien avec Ciro Cattuto, 17.02.17.
37. Entretien avec Brigitte Chamak, 21.01.13.
38. Entretien avec Paul Chapron, 03.02.17.
39. Entretien avec David Chavalarias, 23.03.16.
40. Entretien avec David Chavalarias, 24.04.17.
41. Entretien avec Guillaume Chérel, 06.07.16.
42. Entretien avec Ali Cinar et Fouad Teymour, 16.09.16.
43. Entretien avec Jean-Philippe Cointet, 05.05.14.
44. Entretien avec Vittoria Colizza, 24.07.15.
45. Entretien avec Vittoria Colizza, 09.05.17.
46. Entretien avec Davide Colombi, 13.07.16.
47. Entretien avec Clémentine Cottineau, 12.04.17.
48. Entretien avec Amy Dahan, 02.05.14.
49. Entretien avec Caterina De Bacco, 27.09.16.
50. Entretien avec Jean-Paul Delahaye, 02.06.14.
51. Entretien avec Jean-Paul Delahaye, 14.01.16.
52. Entretien avec Julien Delile, 14.05.15.
53. Entretien avec Jean-Louis Deneubourg, 16.05.13.
54. Entretien avec Bernard Derrida, 08.03.16.
55. Entretien avec René Doursat, 10.03.15.
56. Entretien avec Ralph Dum et José-Luis Fernandez-Villacañas, 20.03.17.
57. Entretien avec Marion Dumas, 05.10.16.
58. Entretien avec Julien Dumont, 23.04.15.
59. Entretien avec Jennifer Dunne, 06.10.16.
60. Entretien avec Jean-Pierre Dupuy, 21.11.12.
61. Entretien avec Brian Enquist, 19.09.16.
62. Entretien avec Brian Enquist, 20.09.16.
63. Entretien avec Dimitri Fabrèges, 23.04.15.
64. Entretien avec Robert Faivre, 19.11.14.
65. Entretien avec Pierre Fosset, 06.07.15.
66. Entretien avec Fausto Fraisopi, 29.01.16.
67. Entretien avec Serge Galam, 19.01.16.
68. Entretien avec Serge Galam, 20.01.16.
69. Entretien avec Serge Galam, 21.01.16.
70. Entretien avec Mirta Galesic, 06.10.16.
71. Entretien avec Jean-Gabriel Ganascia, 12.04.16.
72. Entretien avec Floriana Gargiulo, 15.03.16.

73. Entretien avec Pierre Gaspard, 15.05.13.
74. Entretien avec Laetitia Gauvin, 15.02.17.
75. Entretien avec John German, 23.09.16.
76. Entretien avec Giambattista Giacomin, 13.01.16.
77. Entretien avec Corrado Gioannini, 16.02.17.
78. Entretien avec Antoine Girard, 17.09.15.
79. Entretien avec Eric Godelier, 15.03.17.
80. Entretien avec Laurence Gonzales, 07.10.16.
81. Entretien avec Patricia Adair Gowaty, 21.09.16.
82. Entretien avec Serge Grigorieff, 01.12.15.
83. Entretien avec Joshua Grochow, 07.10.16.
84. Entretien avec David Gross, 17.11.15.
85. Entretien avec Thilo Gross, 22.09.16.
86. Entretien avec Jean-Loup Guillaume, 18.11.14.
87. Entretien avec Pablo Jensen et Guillaume Beslon, 15.09.15.
88. Entretien avec Elizabeth Johnson, 28.09.16.
89. Entretien avec John Harte, 21.09.16.
90. Entretien avec Matthieu Hermann, 24.04.15.
91. Entretien avec Stephen Hubbell, 20.09.16.
92. Entretien avec Antonio Ignazzi, 13.07.15.
93. Entretien avec Stuart Kauffman, 22.03.15.
94. Entretien avec Stuart Kauffman, 25.03.15.
95. Entretien avec Stuart Kauffman, 16.11.16.
96. Entretien avec Daniel Krob, 13.04.16.
97. Entretien avec Joachim Krug, 18.11.15.
98. Entretien avec Jean Lassègue, David Piotrowski et Yves-Marie Visetti, 08.12.15.
99. Entretien avec Sylvie Landrième, 04.07.18.
100. Entretien avec LANL 1, 29.09.16.
101. Entretien avec LANL 2, 29.09.16.
102. Entretien avec LANL 3, 29.09.16.
103. Entretien avec LANL 4, 29.09.16.
104. Entretien avec LANL 5, 29.09.16.
105. Entretien avec LANL 6, 29.09.16.
106. Entretien avec Matthieu Latapy, 16.03.17.
107. Entretien avec Sandra Laugier, 09.02.17.
108. Entretien avec Blake LeBaron, 14.09.16.
109. Entretien avec Mathieu Leclaire, 13.02.17.
110. Entretien avec Alain Leplège, 08.01.16.
111. Entretien avec Annick Lesne, 03.04.15.
112. Entretien avec Jean-Claude Lévy, 13.01.16.
113. Entretien avec Daniel Lévy-Bruhl, 28.06.18.
114. Entretien avec Seth Lloyd, 27.09.16.
115. Entretien avec Giuseppe Longo, ~.03.15 (entretien perdu).
116. Entretien avec Thomas Louail, 01.03.17.
117. Entretien avec Aude Maignan, 14.09.15.
118. Entretien avec Mauro Martino, 12.09.16.
119. Entretien avec Philippe Mathieu, 14.01.16.
120. Entretien avec Nathan Metheny, 27.09.16.
121. Entretien avec Maël Montévil, 23.11.16.
122. Entretien avec Cristopher Moore, 02.04.15.
123. Entretien avec Cristopher Moore, 28.09.16.
124. Entretien avec Edgar Morin, 03.04.12.
125. Entretien avec Matteo Morini, 12.07.16.

126. Entretien avec Michel Morvan, 03.10.16.
127. Entretien avec Melanie Moses, 27.03.15.
128. Entretien avec Melanie Moses, 21.09.16.
129. Entretien avec Matteo Mossio, 28.04.16.
130. Entretien avec Salva Duran Nebreda, 29.02.16.
131. Entretien avec Philippe Nghé, 11.02.16.
132. Interview avec Grégoire Nicolis, 15.05.13.
133. Entretien avec Auguste, Nsonsissa, 15.04.12.
134. Entretien avec Auguste, Nsonsissa, 01.05.12.
135. Entretien avec André Orléan, 04.04.17.
136. Entretien avec Julio Ottino, 16.09.16.
137. Entretien avec Daniela Paolotti, 16.02.17.
138. Entretien avec Paolo Patelli, 28.09.16.
139. Entretien avec Edith Perrier, 19.11.14.
140. Entretien avec Nadine Peyriéras, 23.04.15.
141. Entretien avec Nadine Peyriéras, 24.04.15.
142. Entretien avec Jean Petitot, 22.03.16.
143. Entretien avec Denise Pumain, 10.07.15.
144. Entretien avec Denise Pumain, 28.03.17.
145. Entretien avec Denise Pumain, 27.09.17.
146. Entretien avec Marco Quaggiotto, 15.02.17.
147. Entretien avec Adeline Rausch, 23.04.15.
148. Entretien avec Adeline Rausch, 24.04.15.
149. Entretien avec Rolando Rebolledo, 19.09.16.
150. Entretien avec Sidney Redner, 07.04.15.
151. Entretien avec Sidney Redner, 27.09.16.
152. Entretien avec Sidney Redner, 05.10.16.
153. Entretien avec Romain Reuillon, 31.01.17.
154. Entretien avec Romain Reuillon, 07.02.17.
155. Entretien avec Sébastien Rey-Coyrehourcq, 29.06.17.
156. Entretien avec Ginger Richardson, 05.03.17.
157. Entretien avec Caterina Rizzo, 16.07.18.
158. Entretien avec Catherine Robert, 14.03.17.
159. Entretien avec Eric Rodenbeck, 10.07.18.
160. Entretien avec Daniel Rodriguez-Amor, 29.02.16.
161. Entretien avec Jeremy Sabloff, 23.09.16.
162. Entretien avec Paula Sabloff, 26.09.16.
163. Entretien avec Josep Sardanyès, 29.02.16.
164. Entretien avec Alessandro Sarti, 12.01.16.
165. Entretien avec Lucien Scubla, 23.02.16.
166. Entretien avec Luis Seoane, 29.02.16.
167. Entretien avec Marcel Skrobek, 08.02.16.
168. Entretien avec Ricard Solé, 16.06.15.
169. Entretien avec Ricard Solé, 29.02.16.
170. Entretien avec Eugene Stanley, 12.09.16.
171. Entretien avec Daniel Stein, 08.09.16.
172. Entretien avec Laura Steward, 23.09.16.
173. Entretien avec John Stewart, 04.06.15.
174. Entretien avec Peter Suedfeld, 09.09.15.
175. Entretien avec François Taddei, 25.01.17.
176. Entretien avec Lars Terenius, 20.09.16.
177. Entretien avec Isabelle This Saint-Jean, 27.02.17.
178. Entretien avec Véronique Thomas-Vaslin, 13.12.16.

179. Entretien avec Michele Tizzoni, 15.02.17.
180. Entretien avec William Tracy, 05.10.16.
181. Entretien avec Eugenio Valdano, 12.07.16.
182. Entretien avec Eugenio Valdano, 13.07.16.
183. Entretien avec Franck Varenne, 15.04.16.
184. Entretien avec Alessandro Vespignani, 11.07.16.
185. Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.07.16.
186. Entretien avec Alessandro Vespignani, 12.09.16.
187. Entretien avec Alessandro Vespignani, 14.09.16.
188. Entretien avec Paul Villoutreix, 10.03.15.
189. Entretien avec Paul Villoutreix, 24.04.15.
190. Entretien avec Andreas Wagner, 07.10.16.
191. Entretien avec Mitchell Waldrop, 02.12.16.
192. Entretien avec Gérard Weisbuch, 14.04.16.
193. Entretien avec Geoffrey West, 28.09.16.
194. Entretien avec Geoffrey West, 19.07.18.
195. Entretien avec Joseph Winkin, 15.03.16.
196. Entretien avec Stephen Wolfram, 13.09.16.
197. Entretien avec David Wolpert, 06.10.16.
198. Entretien avec Hervé Zwirn, 11.01.16.

Mails

1. Mail de Ralph Abraham, 13.04.13.
2. Mail de Daniel Andler, 22.03.18.
3. Mail de Jean-Michel Besnier, 05.04.18.
4. Mail de Luis Bettencourt, 04.06.14.
5. Mail de Paul Bourgine, 21.03.18.
6. Mail de Cyrille Bertelle, 29.03.18.
7. Mail de David Chavalarias, 08.04.18.
8. Mail de David Chavalarias, 10.04.18.
9. Mail de Jean-Pierre Dupuy, 04.04.18.
10. Mail de Serge Galam, 24.10.18.
11. Mail de Jean-Antoine Girault, 26.03.18.
12. Mail de Sébastian Grauwin, 08.05.13.
13. Mail de Daniel Krob, 10.11.17.
14. Mail de Daniel Krob, 13.10.17.
15. Mail de Jean Lassègue, Serge Galam, David Piotrowski, Yves-Marie Visetti et Jean-Michel Besnier, 26.04.18.
16. Mail d'Annick Lesne, 07.04.15.
17. Mail de Giuseppe Longo, 07.04.18.
18. Mail de Pablo Jensen, 24.03.18.
19. Mail de Pablo Jensen, 25.03.18.
20. Mail de Jeffrey Johnson, 23.03.18.
21. Mail de Carmel Martin, 19.10.17.
22. Mail d'Alan Newell, 09.03.17.
23. Mail de Jean Petitot, 14.09.18.
24. Mail de Jean Petitot, 17.10.18.
25. Mail de Denise Pumain, 02.07.18.
26. Mail de Denise Pumain, 25.07.18.
27. Mail d'Olivier Rey, 09.03.17.
28. Mail de David Ruelle, 23.05.14.

29. Mail de Joseph Tainter, 24.03.15.

Commentaires

Paul Bourgine, commentaire personnel du 06.03.14.
Martin Warnke, commentaire personnel du 24.06.16.
Commentaire d'Hugues Bersini lors d'un séminaire à l'ISC-PIF, 07.11.16.

Archives consultées

AERES, *Rapport du comité d'experts. Unité de recherche : Centre de Recherche en Épistémologie Appliquée (CREA) – UMR 7656 de l'École Polytechnique*, février 2008.

Besnier, J.-M., « Lettre de démissions à Alain Fuchs », 31 août 2011, archives de Jean-Michel Besnier.

Besnier, J.-M., « Aux amis du CREA le 27-08-11 », archives de Jean-Michel Besnier.

Bourgine, P., Chavalarias, D. et Perrier, E., *French Roadmap for Complex Systems. 2008-2009 Edition*, ISC-PIF, RNSC, IXXI, 2009, en ligne : http://www.iscpif.fr/tiki-index.php?page=Roadmap-fr.

Bourgine, P. & Erceau, J. (présenté par), « Institut des Sciences de la Complexité. Penser *autrement* la complexité », plaquette inaugurale, archives de Paul Bourgine.

Bourgine, P., Orléan, A., Petitot, J., Varela, F., Victorri, B. et Visetti, Y.-M., « Propositions pour un Groupe de Recherche en modélisation des systèmes cognitifs », 22 janvier 1992.

Bourgine, P. & Johnson, J. (ed.), *Living Roadmap for Complex Systems Science. Version 1.22*, IST-FET Coordination Action, Open Network of Centres of Excellence in Complex Systems (ONCE-CS), 31st March 2006.

Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'État, 25 juin 2009

Conseil scientifique du DIM Région Ile-de-France, « Conclusion transmise aux porteurs du DIM Problématiques transversales aux systèmes complexes », archives de Jean-Antoine Girault, 2011.

CS-DC, « Le Campus Numérique des Systèmes Complexes. De la molécule à l'écosphère », plaquette de présentation, 2014, archives de Paul Bourgine.

CNRS, INSERM & INRA. « Convention constitutive du GIS 'Réseau national des systèmes complexes' », archives du RNSC, 2005.

CNRS, INSERM, EP, ENS, UPMC, Paris 11, Paris 1, Institut Curie, Génopole, IHES, EHESS, ESPCI, ENS Cachan, Région Ile-de-France, « Convention constitutive du GIS 'Institut des systèmes complexes Paris Ile-de-France' », 2005, archives ISC-PIF.

CNRS, INSERM, INRA, INRIA, CEMAGREF, IRD, CGE, CPU, IFREMER, CIRAD, « Avenant n. 2 à la Convention constitutive du GIS 'Réseau National des Systèmes Complexes' », archives du RNSC, 2009.

CNRS, « Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'Etat », 25 juin 2009.

CNRS, ISC-PIF, « Contrat de partenariat », document modèle, 2014, archives de David Chavalarias.

Contrat d'objectifs 2009-2013 du CNRS avec l'Etat, 25 juin 2009.

Contrat d'objectifs entre l'État et le Centre national de la recherche scientifique 2015-2018.

Curriculum Vitae d'Henri Atlan.

Curriculum Vitae de Luis Bettencourt.

Curriculum Vitae de Jean-Pierre Dupuy.

Curriculum Vitae de Michel Morvan.

Dum, R., « Towards an orientation paper : An action plan », January 2013, archives de Ralph Dum.

IXXI, « Communiqué de presse. L'Institut rhônalpin des systèmes complexes au cœur de la recherche du 21ème siècle ! », 2005.

IXXI, « Quelle forme pour les plates-formes scientifiques ? », Power Point, archives IXXI, ~2009.

Journal de terrain des Quatrièmes Rencontres Nationales du RNSC, 17-20 novembre 2014, Hôtel Bristol, Mulhouse, France.

Jaeger, C.C., Jansson, P., van der Leeuw, S., Resch, M., Tàbara, J.D., & Dum, R., « Global Systems Science. Orientation paper », 2013, archives de Ralph Dum.

MESR & CNRS, « Action Concertée Systèmes Complexes en SHS » : http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes-termines/systcomplex/appel2004.pdf.

MESR, Stratégie Nationale de Recherche de 2013.

MESR, Stratégie Nationale de Recherche et d'innovation, 2009.

Plaquette de présentation du Cenoli, 1991, archives de Grégoire Nicolis.

Plaquettes informatives de l'ISC-PIF, archives de l'ISC-PIF.

President's Council of Advisors on Science and Technology, *Report to the President on the Technology and the Future of Cities*, février 2016.
Région Ile-de-France, « Domaine d'Intérêt Majeur (DIM). 'Problématiques transversales aux systèmes complexes'. Institut des Systèmes Complexes de Paris Ile-de-France (ISC-PIF) », appel à projet 2014.
SFI, *Santa Fe Institute 2007 Annual Report*, 2007.
SFI, *Santa Fe Institute 2008 Annual Report*, 2008.
SFI, *Santa Fe Institute 2009 Annual Report*, 2009.
SFI, *Santa Fe Institute 2010 Annual Report*, 2010.
SFI, *Santa Fe Institute 2011 Annual Report*, 2011.
SFI, *Santa Fe Institute 2012 Annual Report*, 2012.
SFI, *Santa Fe Institute 2013 Annual Report*, 2013.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, June, 1986, Volume 1, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1987, Volume 2, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1988, Vol. 3, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1988, Vol. 3, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1989, Vol. 4, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1989, Vol. 4, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1990, Vol. 5, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer-Fall, 1990, Vol. 5, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter-Spring, 1991, Vol. 6, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1991, Vol. 6, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring-Summer, 1992, Vol. 7, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall-Winter, 1992, Vol. 7, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1993, Vol. 8, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1994, Vol. 9, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1994, Vol. 9, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 1995, Vol. 10, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1995-1996, Vol. 11, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1996, Vol. 11, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1996-1997, Vol. 12, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1997, Vol. 12, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1998, Vol. 13, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 1998, Vol. 13, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 1999, Vol. 14, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 1999, Vol. 14, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2000, Vol. 15, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2000, Vol. 15, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Summer, 2001, Vol. 16, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2002, Vol. 17, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2003, Vol. 18, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2004, Vol. 19, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Fall, 2004, Vol. 19, Number 2.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2005, Vol. 20, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2006, Vol. 21, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Winter, 2007, Vol. 22, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, Spring, 2008, Vol. 23, Number 1.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2009, Vol. 24.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2011, Vol. 25.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2012, Vol. 26.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2013, Vol. 27.
SFI, *The Bulletin of the Santa Fe Institute*, 2014, Vol. 28.
SFI, « Abell Presentation to Board of Adjustment », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « ACtioN. Applied complexity network @ the Santa Fe Institute », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
SFI, « Appeals Delay Institute Closing. Tom Sharpe », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Articles of Incorporation of Rio Grande Institute. May 22, 1984 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».

SFI, « A proposal to Develop a Broad Research Program on the Sciences of Complexity at the santa Fe Institute, Santa Fe, New Mexico. August 24, 1987 », boîte d'archives « SFI Concepts Mission Statements 1984-1989 ».
SFI, « Bylaws of the Santa Fe Institute. Santa Fe, New Mexico. As amended on November 3, 2013 », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
SFI, « Case #S.E. 1993-5. Patty J. Johnston to Mayor Sam Pick », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « City Oks Institute's Hyde Park Relocation. Michelle Melendez », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « City of Santa Fe, New Mexico. Memo. April 12, 1993. To : Ed Romero, Zoning Division Director. From : Gerald Gonzalez, City Attorney », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Concluding Comments, October Workshop », boîte d'archives « SFI Board Meetings September 9, 1984-March 9, 1986 ».
SFI, « Discussion Paper Concerning the Conception, Creation and Operation of the Rio Grande Institute. May 15, 1984 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
SFI, « Facilities Program. Santa Fe Institute. Prepared by Laban Wingert Associates. Santa Fe, New Mexico. November 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Foundations of Complex Systems. The Santa Fe Institute DARPA Program. Draft White Paper », boîte d'archives « RE Science BD 96 (DARPA) ».
SFI, « Informational Report. Santa Fe Institue Request for Special Exception. March 22, 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, Lettres d'Arthur Spiegel, boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
SFI, « Reflections on Risks, Radicals, and Rewards », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
SFI, « Report of the Computational Resources Committee to the Annual Meeting of the Science Board of the Santa Fe Institute. March 11, 1988 », boîte d'archives « SFI Board Meetings 1988 ».
SFI, « Santa Fe City Code. Land Development », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Santa Fe Institute Application Letter. James W. Siebert and Associates, Inc. April 8, 1993 », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Santa Fe Institute of Science – Protest for Denial of Exemption from Property Taxes for Santa Fe Institute. Rubin, Katz, Salazar, Alley & Rouse. A Professional Corporation. Attorneys at Law », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Santa Fe Institute – Special Exception Appeal. Rubin, Katz, Salazar, Alley & Rouse. A Professional Corporation. Attorneys at Law. Affidavit of Bruce R. Abell », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « Santa Fe Institute's proposal », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « S.F. Institute's plan worries neighbors, Bob Quick, The New Mexican », boîte d'archives « Santa Fe Institute Archival Materials Relating to Acquisition of The Hyde Park Road Campus ».
SFI, « SFI at 7200 Feet. A Resource Guide for the Board of Trustees of the Santa Fe Institute », boîte d'archives « 2015-2016 SFI Promotional material ».
SFI, « SFI Mission Statements, 1986 », boîte d'archives « SFI Concepts Mission Statements 1984-1989 ».
SFI, « The Aims of the Rio Grande Institute. Draft 5/30/84 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
SFI, « The Aims of the Rio Grande Institute. September 20, 1984 », boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
SFI, Lettres d'Arthur Spiegel, boîte d'archives « SFI Early Docs Development Archives ».
Visetti, Y.-M., « Sys comp notes », autour de 1999.
UNESCO & CS-DC, « Accord entre l'Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture et le Réseau 'Campus Numérique des Systèmes Complexes' concernant l'établissement d'un programme de coopération UNITWIN », 2014, archives de Cyrille Bertelle.
Weisbuch, G. (éd.), *Tackling Complexity in Science*, European Commission, Directorate-General for Research, 2007, archives de Gérard Weisbuch.