

Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

ED CRIT – ED 538

Architecture

## **Invention architecturale et algorithmes non-linéaires**

Liang MA

Thèse de Doctorat

sous la direction de M. Arnaldo Rivkin

Soutenance du 27 mai 2015

Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

Composition du jury :

Monsieur Arnaldo Rivkin : directeur de thèse, professeur de théorie et pratique de la conception architecturale et urbaine à l'ENSA-Versailles, architecte, docteur EHES, HDR.

Monsieur Christian Brouder : directeur de recherche de première classe au CNRS– Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, HDR.

Monsieur Pierre Caye : directeur de recherche au CNRS -UMR 8230 (ENS de la rue d'Ulm-CNRS) , HDR.

Monsieur Nicolas Tixier : architecte, docteur en sciences pour l'ingénieur, maître-assistant à l'ENSA-Grenoble, chercheur au laboratoire Cresson (UMR CNRS/MCC/ECN n°1563).

Monsieur Rémi Rouyer : maître-assistant à l'ENSA-Paris Malaquais, architecte DPLG, docteur en histoire de l'art, chercheur au laboratoire de recherche LéaV (ENSA-Versailles).

## Table des matières

### 1. Introduction

Générale .....	5
<b>1.1 Les algorithmes en architecture .....</b>	<b>7</b>
1.1.1 Qu'est-ce qu'un algorithme .....	7
1.1.2 Non linéarité et l'architecture .....	8
1.1.2.1 <i>Système linéaire et Système non-linéaire</i> .....	8
1.1.2.2 <i>Non-linéarité dans 'architecture</i> .....	9
1.1.2.3 <i>Les nuances entre des projets « paramétriques » et « algorithme non-linéaire »</i> .....	10
1.1.3 Les outils numériques .....	13
<b>1.2 L'architecture entant qu'un système complexe .....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Qu'est-ce qu'un système complexe.....	17
1.2.2 Le rapport entre système complexe et l'architecture .....	20
<b>1.3 Tendance numérique dans l'architecture .....</b>	<b>23</b>
1.3.1 Le rapport entre la science et l'architecture .....	23
1.3.2 Questions à propos des projets de l'architecture numérique .....	24
<b>2. Projets réalisés à partir de l'algorithme non-linéaire .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Notions empruntées par des architectes dans les systèmes complexes .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Fondements d'une taxinomie .....</b>	<b>48</b>
<b>2.3 Collection de projets illustrant cette taxinomie .....</b>	<b>52</b>
<b>3. Analyse .....</b>	<b>75</b>
<b>3.1 Similarités et différences au sein des catégories proposées .....</b>	<b>75</b>
3.1.1 Fractale .....	76
3.1.2 Système à réaction-diffusion .....	97

3.1.3 Automate Cellulaire .....	109
3.1.4 Algorithme évolutionniste .....	120
3.1.5 Système multi-agents .....	135
3.1.6 Intelligence collective .....	156
<b>4. Conclusion Générale .....</b>	<b>160</b>
<b>4.1 « Vers une architecture » : nouvelle ?.....</b>	<b>161</b>
<b>4.2 Le déficit architectural des images numériques.....</b>	<b>162</b>
<b>4.3 L'élégance à l'heure de la mondialisation.....</b>	<b>166</b>
<b>4.4 L'opérativité architecturale des notions numériques.....</b>	<b>168</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>171</b>
<b>Sources iconographiques .....</b>	<b>187</b>

## Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux personnes grâce auxquelles cette thèse a vu le jour. Tout d'abord Monsieur Arnaldo Rivkin dont l'enseignement a été décisif dans ma formation avec une approche très exigeante de la conception architecturale et qui a généreusement accepté de diriger ce travail. Je remercie chaleureusement Monsieur Christian Brouder et Monsieur Pierre Caye d'en être les rapporteurs et dont les observations riches et précieuses à l'examen du manuscrit ont été rassérénantes. Je remercie également Monsieur Nicolas Tixier de m'avoir fait l'honneur d'être présent au jury.

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire LéaV dirigé par Madame Catherine Bruant. Je la remercie vivement de m'y avoir accueilli et prodigué ses bons conseils.

Je remercie Monsieur Rémi Rouyer et Monsieur Sébastien Rynckel qui en deçà de nos collaborations ont été des interlocuteurs attentifs et inventifs.

Merci à Isabelle et Jean-Marie Dancy de leur assistance bienveillante ainsi qu'à tous mes amis qui m'ont conforté dans cette longue et difficile entreprise.

Merci à mes parents, Xikai MA et Meihua Qiao, pour leur appui inconditionnel tout au long de ces vingt-neuf dernières années.

## 1. Introduction Générale

Depuis 50 ans, le débat sur l'impact et la juste utilisation de l'informatique dans l'architecture ne cesse de rebondir ; tel le sphinx qui renaît de ses cendres, chaque innovation en son domaine, chaque avancée technologique le relance d'autant. C'est un fait patent que les outils informatiques offrent des possibilités inédites de concevoir des espaces. Pourtant ces développements n'ont pas été sans une résistance de la part des maîtres d'œuvre soucieux de préserver leurs prérogatives. Peter Eisenman a dit une fois dans une entrevue « Aucun ordinateur ne m'a servi pour le Biowentrum<sup>1</sup> ; c'était moi, l'ordinateur. »<sup>2</sup> (Il est pourtant un des précurseurs de l'architecture numérique). 28 ans plus tard, l'utilisation de l'ordinateur pour faire un projet est devenu inévitable, c'est un outil indispensable. Toutefois, il est utilisé la plupart du temps uniquement pour la préparation de dessins routiniers de construction (plan, coupe, élévation, etc.) sur lesquels il permettait des gains de productivité mais avait en fait que peu ou aucune influence sur le processus de conception et le produit final. Pour utiliser l'ordinateur comme un outil capable d'interagir dans le processus de conception, il faudra d'abord répondre à la question posée par Christopher Alexander « quels sont les problèmes connus que peut résoudre un ordinateur. »<sup>3</sup>

Aujourd'hui, si on feuillette des revues d'architecture ou consulte internet, des projets réalisés physiquement ou virtuellement, il est de plus en plus difficile de comprendre ce qui se passe. De nombreux des projets portant des noms différents comme « architecture numérique », « design paramétrique », « design génératif », « architecture digitale »,...etc., empruntent souvent les fruits des dernières

1. Dans le cadre du projet soumis au concours du Biozentrum à Francfort, l'agence de Peter Eisenman a opté pour l'ordinateur afin de pouvoir mettre à l'échelle, positionner et répéter un langage de symboles d'acides aminés, d'abord dans un plan en deux dimensions et plus tard dans une perspective et des vues axonométriques réalisées de façon numérique.

2. Greg Lynn. (2013) *Archéologie du numérique*, Cahier d'observation, Centre Canadien d'Architecture, Sternberg Press, p17

3. Christopher Alexander a dit dans « *The Question of Computers in Design* », 1967, « un ordinateur est, essentiellement, la même chose qu'un énorme bataillon d'employés, équipés d'un manuel, de papier et crayons, complètement stupides et sans initiative, mais capables de suivre des millions d'opérations précises et bien définies... Pour savoir comment peuvent œuvrer les ordinateurs dans le design architectonique, il est nécessaire de se demander tout d'abord quels sont les problèmes connus que peut résoudre ce bataillon d'employés... pour l'instant, les problèmes de ce type sont peu nombreux ».

recherches scientifiques en chimie, physique, biologie, mathématique, informatique pour se satisfaire d'images purement formelles où ce qui fait l'architecture est plus qu'évoquée. Dans certaines écoles d'architecture, il est demandé aux étudiants d'apprendre à écrire des scripts pour modéliser ou simuler des réactions chimiques, des comportements de fluide, etc. sans vraiment de rapport direct avec l'architecture avec des résultats sont souvent très décevants. De purs objets décontextualisés, comme artistes, qui peuvent ressembler à du chewing-gum<sup>4</sup> sont produits (Fig. 1.1, 1.2). Les descriptions qui accompagnent ces projets ont l'air de parler de l'architecture mais restent très allusives, impressionnistes. Les critiques sur ces projets sont elles aussi fragmentées et abscones comme les différentes disciplines et théories souvent complexes auxquelles elles se réfèrent. Il devient de la sorte difficile d'apprécier ces œuvres dès lors que la connaissance de leurs processus de conception et des objectifs visés demeurent dans le flou. Certes les recherches pionnières présentent toujours des défauts et on peut comprendre qu'un travail d'expérimentation ignore certains aspects architecturaux.

Nous proposons afin d'y voir plus clair, et non plus juger les projets isolément, de mettre en avant la manière dont ils sont générés et les liens qu'ils entretiennent avec les autres disciplines auxquelles ils empruntent leurs modèles. Pour ce faire nous proposons une classification des projets les plus manifestes directement référée aux modèles scientifiques.

Et dans le même temps d'évaluer ces projets avec les notions et catégories de l'architecture qui par devers le temps ont su conserver leur pertinence.

4. Ce sont des projets qui ont souvent des formes organiques et compliquées, difficiles cependant à imaginer comme un bâtiment.



Figure 1.1 Roland Snooks, *Speculative Research*, 2010



Figure 1.2 Daniel Widrig, *Tower Study No.7*, 2012

## 1.1 Les algorithmes en architecture

### 1.1.1 Qu'est-ce qu'un algorithme

Toute une terminologie désigne les projets faits avec le recours de l'ordinateur : architecture numérique, architecture paramétrique, architecture générative, architecture digitale, etc. Une littérature prolige s'est développée autour de cette question qui s'emploie régulièrement à proposer classifications et explications.

Sans rentrer dans ces distinctions parfois byzantines, elles ont toujours un point commun : l'utilisation d'algorithmes.

Il existe plusieurs définitions de l'algorithme. Mais simplement dit, « un algorithme est une recette, une méthode ou technique pour faire quelque chose ». <sup>5</sup> Il peut être long ou très court. Le mot « algorithme » est dérivé du nom d'Al Khwarizmi (mathématicien persan du IX<sup>ème</sup> siècle)<sup>6</sup>, qui introduisit en Occident la numération décimale et enseigna les règles élémentaires des calculs s'y rapportant . « La notion d'algorithme est donc historiquement liée aux manipulations numériques, mais elle s'est progressivement développée pour porter sur des objets de plus en plus complexes, des textes, des images, des formules logiques, des objets physiques, etc »<sup>7</sup>. L'idée d'un algorithme comme procédure formelle est antérieure à l'existence des ordinateurs, mais utiliser un ordinateur signifie toujours activer une procédure algorithmique qui transforme les données depuis l'entrée vers la sortie. En architecture, cela signifie formaliser le processus de conception selon un ensemble de procédures et d'instructions spécifiques. Ce peut être invisible pour le concepteur à travers l'interface d'un programme de CAO<sup>8</sup>, dans lequel une bibliothèque qui

5. Robert A. Wilson et Frank C. Keil, « The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences », The MIT Press, 2001, p.11

6. Philippe Flajolet et Etienne Parizot, « Qu'est-ce qu'un algorithme? », *interstices.info*, 24 Février 2004, URL: [https://interstices.info/jcms/c\\_5776/que-st-ce-quun-algorithme](https://interstices.info/jcms/c_5776/que-st-ce-quun-algorithme)

7. Kostas Terzidis, *Algorithmic Architecture*, Oxford, Architectural Press, 2006, p.xii

8. CAO signifie « conception assistée par ordinateur », elle comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique des produits manufacturés et de les réaliser ; elle peut procéder de la même manière avec les outils et machines qui les fabriquent.

rassemble génériques, objets géométriques, relations et attributs comme inputs potentiels accompagnés de leur représentation visuelle et qui, en tant que données sortantes, sont déjà codés. Par contre, ils doivent demeurer perceptibles au concepteur qui programme -pour les contrôler- les données fournies au logiciel et qui en spécifie les résultats.

### 1.1.2 Non linéarité et architecture

#### 1.1.2.1 Système linéaire et Système non-linéaire

Un système linéaire peut être décrit par des équations linéaires, il obéit au double principe d'additivité et d'homogénéité<sup>9</sup>: toute combinaison linéaire des variables de ce système est encore une variable de ce système. Les systèmes non linéaires sont plus difficiles à étudier que les systèmes linéaires.

Les systèmes non linéaires sont ceux pour lesquels la transformation n'est pas proportionnelle aux données d'entrée et dont l'effet n'est pas proportionnel à la cause. En mathématiques, les équations non linéaires ne peuvent pas être transformées en lignes droites et peuvent ou non être résolues. « Elles sont caractérisées algébriquement en intégrant au moins une variable exponentielle supérieure à 1, par exemple,  $X^2$  ou  $X^3$ . L'une des caractéristiques peut être un changement ou une fluctuation importante, rapide et inattendue. Le mouvement d'un pendule est l'un des problèmes les plus connus et a fourni une contribution importante à la compréhension mathématique des systèmes non-linéaires. »<sup>10</sup>

9. Une fonction linéaire  $f(x)$  satisfait aux propriétés suivantes :

Additivité:  $f(x + y) = f(x) + f(y)$ .

Homogénéité :  $f(\alpha x) = \alpha f(x)$  pour tout  $\alpha$ .

10. Jane Burry, Mark Burry, *Mathématiques et architecture*, Arles, Actes Sud, 2010, p. 259

### *1.1.2.2 Non-linéarité dans l'architecture*

L'architecture ne peut-être un système simple ou linéaire, n'en déplaise à Vignole et à JNL Durand qui chacun à leur manière ambitionnaient de fournir des principes architecturaux simples et facilement applicables, mais qui apparaissent avec le temps souvent comme des recettes galvaudées. Le travail d'un architecte s'effectue à travers des domaines très variés, souvent hétérogènes les uns aux autres, conceptuels, esthétiques, matériels, constructifs, économiques, sociologiques, environnementaux, etc. Ces éléments (questions non-linéaires) sont souvent associés et s'influencent les uns les autres. Un exemple trivial : pour garantir une meilleure résistance à la structure porteuse, il est possible de grossir poteaux et poutres, mais en conséquence, le coût s'en trouve pénalisé.

Dans la morphogenèse d'un projet d'architecture, linéarité et non linéarité se retrouvent. En CAO, un cas élémentaire de linéarité est la constitution des matrices virtuelles des éléments porteurs par la seule duplication d'une même unité ou encore le changement d'échelle de telle ou telle partie de bâtiment à travers un agrandissement proportionnel, car un agrandissement linéaire des longueurs donne un agrandissement quadratique des surfaces et cubique des volumes.

Et si à présent on se focalise sur ce qui constitue la part essentielle de l'apport de l'architecte : la conception d'espace ; la relation entre le plan et la coupe mérite qu'on s'y attarde. Pour beaucoup un projet s'élabore initialement en plan de façon horizontale et se lève ensuite en coupe de façon presque mécanique : le plan commande. Certes ce travail en plan est déjà non linéaire mais si l'on s'abstrait de

cette soumission afin de rendre au plan et à la coupe leur totale autonomie, le projet devient alors un processus itératif dans lequel s'affrontent les puissances propres voire contradictoires de chacune de ces deux représentations, un processus non déterministe d'où peuvent émerger des solutions inattendues, nouvelles.

### 1.1.2.3 *Les nuances entre projet « paramétrique » et « algorithme non-linéaire »*

Aujourd'hui, parmi tous les outils informatiques au service des architectes, la plupart d'entre eux permettent de paramétrer les dessins en 2D et les modèles en 3D. C'est-à-dire qu'en établissant une règle précise, il est possible de modifier les paramètres initiaux pour faire varier le résultat. La modélisation paramétrique est basée sur une relation topologique statique. Dans ses modèles, il y a toujours une relation « linéaire » entre les paramètres et les géométries. Tous les résultats sont déjà prédéfinis dans la condition initiale (Fig. 1.3).

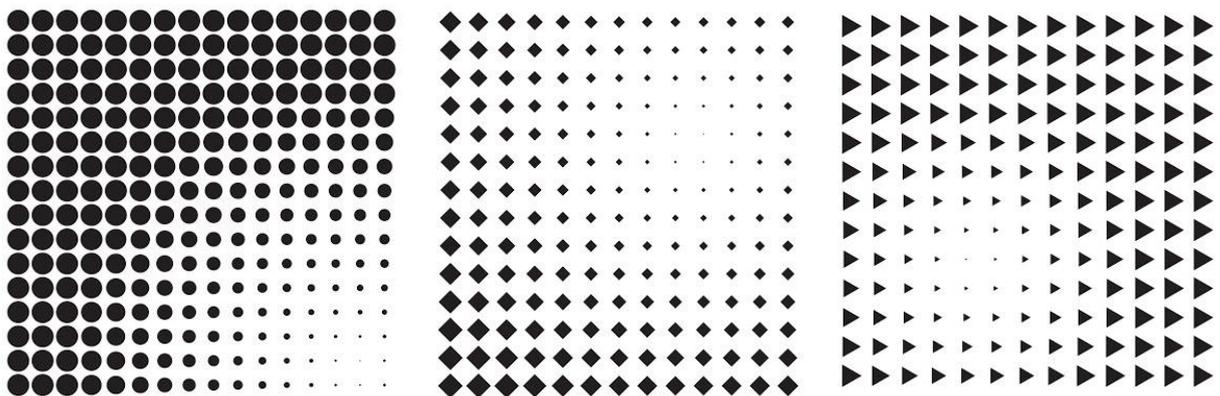


Figure 1.3 Un exemple classique de design paramétrique. Douglas SHARPE, *Generative Design Computing*. Sharpe – Project 2, 2010

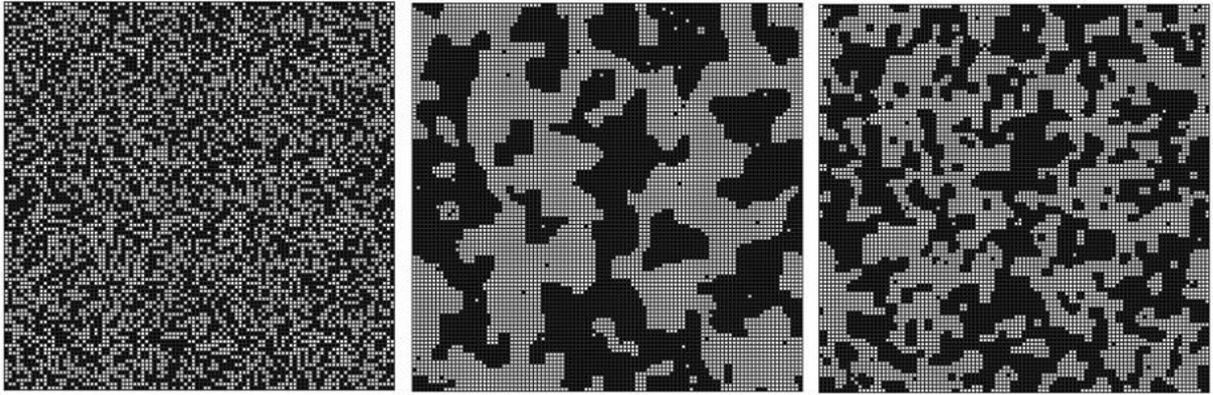


Figure 1.4 Le modèle d'Ising modélisé par l'automate cellulaire, Nazim FATES, le modèle d'Ising, 2002

L'avantage ou l'objectif de la modélisation paramétrique est de faciliter la modification du modèle. Pour modéliser une forme, les designers doivent comprendre et maîtriser les liens entre les paramètres et les résultats. Par contre, il est important de savoir qu'en utilisant des plug-ins ou insertion de script, certains outils paramétriques peuvent aussi faire fonctionner des algorithmes non-linéaires et se défaire du contrôle entier des résultats.

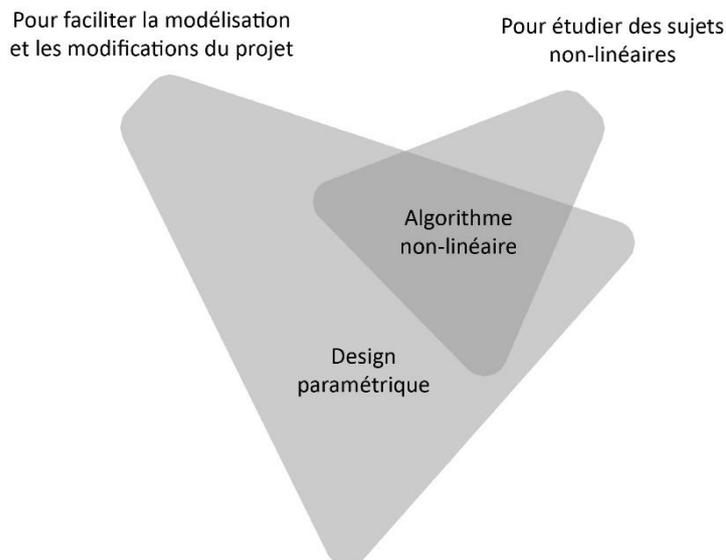


Figure 1.5 Ce schéma montre la relation entre « design paramétrique » et « algorithme non-linéaire »

La plus grande différence entre la méthode de design « paramétrique », « traditionnelle » et la méthode de design non-linéaire est que les résultats proposés par cette dernière ont toujours un caractère d'émergence (Fig. 1.4). Certes le processus de conception spatiale est séquentiel car constitué par des étapes bien différenciées d'évolution : premières idées, définition, précision des détails, mais il est aussi un processus itératif, récursif, constitué par des boucles successives qui mêlent analyse, synthèse et évaluation pour déterminer la solution de sous-problèmes convergeant à la résolution finale. L'effet d'émergence d'un système non-linéaire est partie intégrante de ce processus de conception pouvant surgir d'un moment à l'autre au cours de ces boucles itératives. En revanche, les résultats proposés par un système linéaire sont toujours prédéfinis et peuvent être très tôt figurés par le concepteur. (Fig. 1.5)

Pour mettre en œuvre un algorithme non-linéaire aujourd'hui, il est nécessaire d'utiliser des logiciels spécifiques<sup>11</sup>. Comme ces relations opèrent à un niveau local, elles peuvent former une structure très complexe comme celle générée par le système d'automate cellulaire. Le fonctionnement des scripts au niveau local a des relations non-linéaires. Ce processus est fondamentalement différent de la méthode de design paramétrique qui change seulement les paramètres à l'intérieur d'un modèle. Donc, ces opérations sur des algorithmes non-linéaires peuvent aboutir à une complexité considérable au niveau global.

Dans l'ouvrage qu'il dirige « Architecture in the Digital Age : Design and Manufacturing », Branko Kolarevic souligne les possibilités offertes par les outils paramétriques faisant de la

*11. En architecture, les logiciels comme Processing et certains plug-in compatibles avec le logiciel Rhinocéros ou encore des langages de programmation informatique comme Java ou VB sur des plateformes diverses sont parmi les plus utilisés pour exploiter les algorithmes non-linéaires.*

conception non plus un processus « stable et singulier » mais « variable et multiple ». <sup>12</sup>

Dans le même ouvrage, Chris Yessios en pointe toutefois les risques inhérents : *« C'est devenu un mot à la mode aujourd'hui. Alors que les discussions sur la tendance paramétrique vont bon train, il y a en fait peu de compréhension de ce qu'elle signifie vraiment pour la conception architecturale. C'est, une fois de plus, un terme dérivé de l'ingénierie; en tant que technique, il n'est pas encore complètement familier aux techniques de l'architecture. Ce transfert d'un champ à l'autre, sans une adoption entière, est une entreprise dangereuse, car elle contient le risque d'apparaître étrangère aux utilisateurs de la seconde discipline, ce qui conduit typiquement à des situations improductives... Pour développer une représentation paramétrique complète des éléments architecturaux, il faut évaluer, comprendre et interpréter le comportement intrinsèque de ces éléments; ce processus peut être assez subjectif, et c'est un phénomène assez typique dans la conception architecturale. Au risque de paraître pessimiste, permettez-moi de suggérer que toutes les structures architecturales disponibles dans le commerce qui prétendent être paramétriques relèvent seulement de l'ingénierie et ne parviennent pas aux critères spécifiquement architecturaux. »*<sup>13</sup>

### 1.1.3 Les outils numériques

Dans les années 1970, les outils numériques de représentation et modélisation ont commencé à être utilisés dans le monde architectural. Depuis, ils n'ont cessé de

12. *« Parametrics can provide for a powerful conception of architectural form by describing a range of possibilities, replacing in the process stable with variable, singularity with multiplicity. Using parametrics, designers could create an infinite number of similar objects, geometric manifestations of a previously articulated schema of variable dimensional, relational or operative dependencies. When those variables are assigned specific values, particular instances are created from a potentially infinite range of possibilities. »*

*Branko Kolarevic, Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing, New York, Spon Press, 2003, p.25*

13. *Chris Yessios, « Is there more to come? » in Branko Kolarevic, Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing, New York, Spon Press, 2003, p.358-359*

d'accroître leur influence et sont aujourd'hui presque irremplaçables pour faire un projet.

De la même façon que les modèles analogiques telles les maquettes, les modèles numériques permettent de simuler et représenter des qualités morphologiques et spatiales. La principale spécificité des modèles numériques est qu'ils sont modélisés dans un espace tridimensionnel virtuel, dont nous n'avons connaissance qu'à travers les représentations bidimensionnelles dynamiques qu'on obtient sur l'écran. Les principales catégories d'outils numériques qui sont utilisés dans la conception spatiale en architecture et en ingénierie, sont :

*a) Modélisation et représentation géométrique 3D,*

*b) Modélisation, représentation et animation 3D.*

*c) Modélisation et simulation*

*d) Langage de script*

*e) Modélisation paramétrique*

*a) Outils de modélisation et représentation géométrique*

Les outils de modélisation tridimensionnelle (Autocad, Vectorworks, etc) permettent de figurer en 3D des objets aux formes très variées, en partant d'éléments et d'opérations standards (dessin d'une ligne droite, d'un cercle, d'une surface, etc.). Ce sont des outils de pure représentation : ils permettent de dessiner de la même façon qu'à la main. En général, ces outils peinent à engendrer des formes complexes. Par contre, ils sont utilisés de temps en temps comme une plateforme de transfert (importation et exportation de modèles générés par des autres logiciels). Et

par l'influence des autres outils, les dernières versions de ces logiciels ont commencé à intégrer de plus en plus de fonction de design paramétrique comme bloc dynamique. (Fig.1.6)

### b) Modélisation, représentation et animation 3D

Les outils de modélisation et animation 3D (Sketchup, 3DS Max, Rhinoceros ou Maya, etc.) sont des outils développés dans le milieu de l'animation pour le cinéma. Ils permettent en partant d'opérations intuitives (pliage, gonflage, déformation, etc.) (Fig. 1.7) de modéliser des configurations géométriques complexes, des formes à courbure variable ainsi que des séquences d'objets en mouvement. Ces outils sont largement utilisés dans l'architecture numérique aujourd'hui pour modéliser des formes complexes. Ces logiciels ont acquis la possibilité d'intégrer des scripts et d'accueillir des plug-ins développés par d'autres.

### c) Modélisation et simulation

Les outils de modélisation et simulation (K3Dsurf, RealFlow (Fig. 1.8) ou StarBiochem, etc.) sont des outils développés pour la recherche en mathématique, physique ou biologie. Ils permettent en partant de commandes intégrées dans ces logiciels (des équations, la nature du liquide ou des séries d'ADN) de simuler et visualiser des modèles complexes comme les surfaces minimales, la déformation d'un liquide par la force extérieure ou les formes d'un système nerveux. Ces formes éminemment complexes n'ont pas manqué d'intéresser les architectes qui ont commencé à s'en servir pour les transformer et les appliquer dans leurs projets architecturaux. Les modèles générés par ces outils conservent le même degré de complexité, mais ils sont difficiles à manipuler non seulement à cause de cette

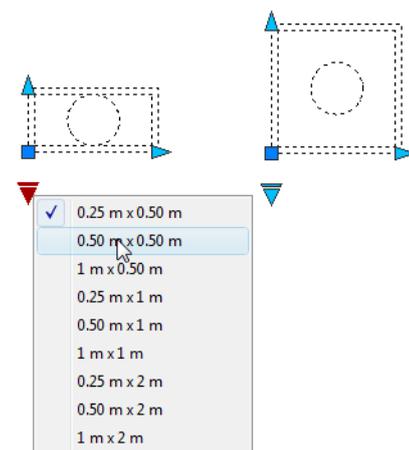


Figure 1.6 Bloc dynamique de l'Autocad

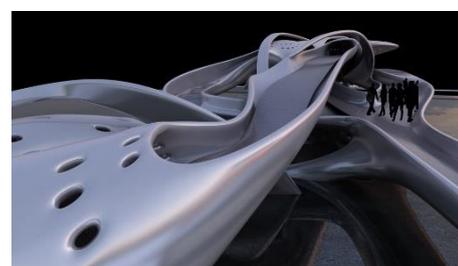


Figure 1.7 « inFLOWING bridge » modélisé par Maya.

AmniosyA Architecture, Pedestrian Bridge for Amsterdam, 2012



Figure 1.8 « Resonance », modélisé par RealFlow, Federico Diaz, Resonance, 2007

dernière mais aussi de la connaissance scientifique qu'ils requièrent.

#### d) Langage de script

Les outils permettant de générer des modèles à partir de langages de script (VB, Javascript, Python, Processing) ont été développés à leur début pour des programmeurs, mais depuis 10 ans, pour des jeunes architectes qui ne veulent pas être contraint par la capacité de logiciels comme Autocad, Maya ou Rhino. Afin d'explorer des formes typologiquement plus complexes, ils ont commencé à apprendre les langages de scripts et écrire des scripts eux-mêmes sur la plateforme Rhino, Maya ou Processing (Fig. 1.9). L'avantage de ces outils est qu'ils sont des plateformes ouvertes, où il est possible de faire fonctionner toutes sortes d'algorithmes. Par contre, maîtriser ces scripts requiert beaucoup de temps, avec le risque que les objets générés soient architecturalement décevants.

#### e) Modélisation paramétrique

Des outils comme Grasshopper, Revit, Archicad ont été créés pour faciliter la modélisation et la modification en 3D (Fig. 1.10). Ils sont principalement dédiés au design paramétrique. Leur objectif est d'établir une relation claire entre les données initiales et le résultat final. Mais, grâce à la facilité d'utilisation de ces plateformes -à l'instar de Grasshopper- et au nombre élevé d'utilisateurs, beaucoup de plug-ins<sup>14</sup> (Galapagos, Kangaroo<sup>15</sup>, etc.) ont été développés par des groupes indépendants. Cet enchaînement de plug-ins venant

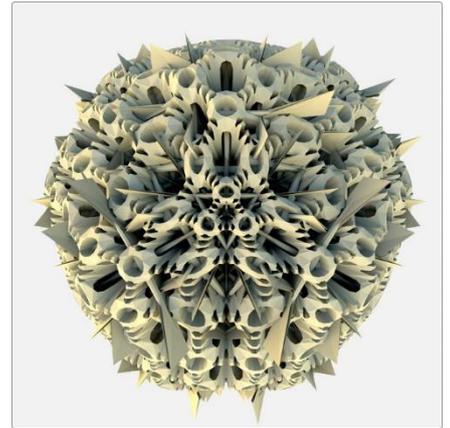


Figure 1.9 « Platonic Solids », modèle généré par Processing, Michael Hansmeyer, Platonic Solids, 2010



Figure 1.10 « Cultural Center Chapultepec Competition Entry », façade créée par Grasshopper. Adrian Yau, Frisly C. Morales, Jason Easter, Lukasz Wawrzenczyk, Cultural Center in Guadalajara Competition Entry, 2013

14. En informatique, un plug-in est un appendice qui complète un logiciel hôte pour lui apporter de nouvelles fonctionnalités.

Grasshopper, Kangaroo, Galapagos sont tous des plug-ins. Grasshopper est un plug-in de Rhino. Kangaroo et Galapagos sont des plug-ins de Grasshopper.

se greffer les uns à la suite des autres permet de traiter des questions complexes.

Dans cette famille, il faut remarquer une tendance qui connaît aujourd'hui un certain succès : le logiciel BIM (Building Information Modeling) qui se consacre à optimiser la productivité, de la conception jusqu'à la construction. Ce système englobe la géométrie de la construction, les relations spatiales, les informations géographiques, les quantités ainsi que les propriétés des éléments de construction. Ces informations sont saisies par différents corps de métiers dans un projet pour économiser le coût et mieux coordonner des différents rôles dans un projet. Le projet du musée de Frank Gehry pour la Fondation Louis Vuitton au bois de Boulogne a été piloté selon la méthode BIM.

15. *Galapagos* est un plug-in de Grasshopper qui permet de faire fonctionner des algorithmes évolutionnistes.

*Kangaroo* est aussi un plug-in créé pour la simulation, optimisation et modélisation de la forme dans Grasshopper qui prend en compte de la force extérieure comme gravité en temps réel.

## 1.2 L'architecture en tant qu'un système complexe

### 1.2.1 Qu'est-ce qu'un système complexe

*« La multiplicité de connaissance, loin de nuire au développement de l'art, comme l'assurent des esprits étroits est, au contraire, la condition nécessaire de ce développement... »*

*Mais le préjugé est tenace. Nous vivons depuis longtemps, depuis des siècles, dans la sottise persuasion que l'art est une sorte d'entité distincte de toutes les autres formes de l'intelligence humaine, absolument indépendante, ayant sa source et les éléments uniques de son développement dans l'imagination fantaisiste et capricieuse de l'artiste lui-même »*

*Jean-Antoine-Gabriel Davioud 1878*

L'étude des systèmes complexes qui convoquent de nombreuses disciplines s'est constituée en un cadre unifié et est depuis reconnue comme un champ du savoir à part entière<sup>16</sup>. Mais malgré l'ensemble des débats qu'a suscité sa définition, aucune vraiment n'a prévalu sur l'autre, et de fait circule de nos jours un certain nombre de définitions différentes. On adoptera pour notre part celle proposée par Hiroki Sayama<sup>17</sup> la plus limpide et facile à comprendre : « *les systèmes complexes sont des réseaux constitués d'un certain nombre de composants qui interagissent les uns avec les autres de façon typiquement non linéaire. Les systèmes complexes peuvent survenir et évoluer à travers l'auto-organisation, de sorte qu'ils ne sont ni tout à fait réguliers, ni complètement aléatoires, permettant le développement d'un comportement émergent à échelle macroscopique* ». <sup>18</sup>

La plupart des systèmes qui nous entourent sont complexes, et l'architecture en fait partie. En comprendre les propriétés motive un grand nombre de chercheurs et mobilise tous leurs efforts. Pendant de nombreuses années, les disciplines scientifiques tout comme les techniques industrielles opéraient dans des domaines bien circonscrits. Mais soudainement ces champs bien séparés comme par exemple la biologie moléculaire et l'économie ont été convoqués afin d'expliquer entre autres les impacts résultant de comportements de panique collective au moment des crises monétaires ou des faillites en chaîne; ou encore, l'exemple plus classique des recherches sur la conscience : il est facile de dire qu'on a une conscience, mais il est difficile à décrire le processus nerveux qui permet cette conscience. Il s'agit d'un processus microscopique non seulement physique mais aussi chimique.

16. Y. Bar-Yam, *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley Reading, MA, 1997, p.2

17. Hiroki Sayama est le directeur de 'Collective Dynamics of Complex Systems Research Group à l'université de Binghamton

18. « Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems », Hiroki Sayama, publication prévue en 2015, p.3 (traduction personnelle)

On se reportera également à la définition que Melanie Mitchell donne des systèmes complexes qui pointe justement comment ces derniers peuvent générer des processus auto-organisationnels ou émergents.

*« Un système dans lequel les réseaux de composants sont sans contrôle central et de simples règles de fonctionnement donnent lieu à un comportement collectif complexe, un traitement sophistiqué de l'information, et une adaptation par apprentissage ou évolution... Les systèmes dans lesquels les comportements s'organisent sans contrôle ou direction imposés sont parfois appelés auto-organisationnels. Parce que les règles simples produisent des comportements complexes difficilement prévisibles, à l'échelle supérieure ces comportements sont parfois appelés émergents. La question centrale des sciences de la complexité est de savoir comment ce comportement auto-organisé émergent se produit. »*<sup>19</sup>

19. Melanie Mitchell, *Complexity, A Guided Tour*, Oxford, Oxford Press, 2009, 366 p. 13

Pourquoi la nature d'un système complexe est intrinsèquement liée à ses composants ? Les systèmes simples sont tout autant formés de composants multiples. Pour expliquer la différence entre systèmes simples et complexes, les termes « interconnecté » ou « imbriqué » sont essentiels. Pour comprendre le comportement d'un système complexe, nous devons comprendre non seulement le comportement des parties, mais aussi la façon dont elles agissent ensemble pour former un tout doté d'un comportement qui lui est propre. La difficulté est que nous ne pouvons pas décrire le tout sans en décrire chaque partie, et que chaque partie doit être décrite par rapport aux autres parties.

### 1.2.2 Le rapport entre système complexe et architecture

Le système complexe est une discipline très vaste qui a induit une quantité de sujets d'étude importante. Comme des questions complexes existent dans presque toutes les disciplines, en physique, chimie, biologie, etc., il est difficile d'en avoir une appréciation exhaustive. Par contre, à partir du travail de Yaneer Bar-Yam, son élève Hiroki Sayama a établi un diagramme regroupant en 7 groupes l'ensemble des sujets concernés par les systèmes complexes (Fig. 1.11). Signalons d'emblée que nombre de notions employées par Hiroki Sayama le sont également par les auteurs de projets d'architecture analysés au chapitre 3, telles que modélisation multi-agents, algorithme évolutionniste, essaim ...

A ce stade toutefois il est peut-être un peu rapide d'établir un lien entre le système complexe et l'architecture d'algorithme non linéaire.

En effet, le processus de ce travail est aussi non linéaire. Andrew John Wiles, mathématicien britannique, connu pour avoir démontré le dernier théorème de Fermat en 1994 décrit son travail à travers cette métaphore. Pour lui le processus de démonstration du dernier théorème de Fermat ressemble à la traversée d'une série de chambres complètement noires dans lesquelles on ne voit rien. Il lui faudra d'abord explorer par tâtonnement les uns à la suite des autres tous les meubles de la chambre, jusqu'à il se familiarise à la configuration de cette chambre pour trouver le bouton de la lampe, une fois la chambre éclairée, il trouvera la porte de la chambre noire suivante.

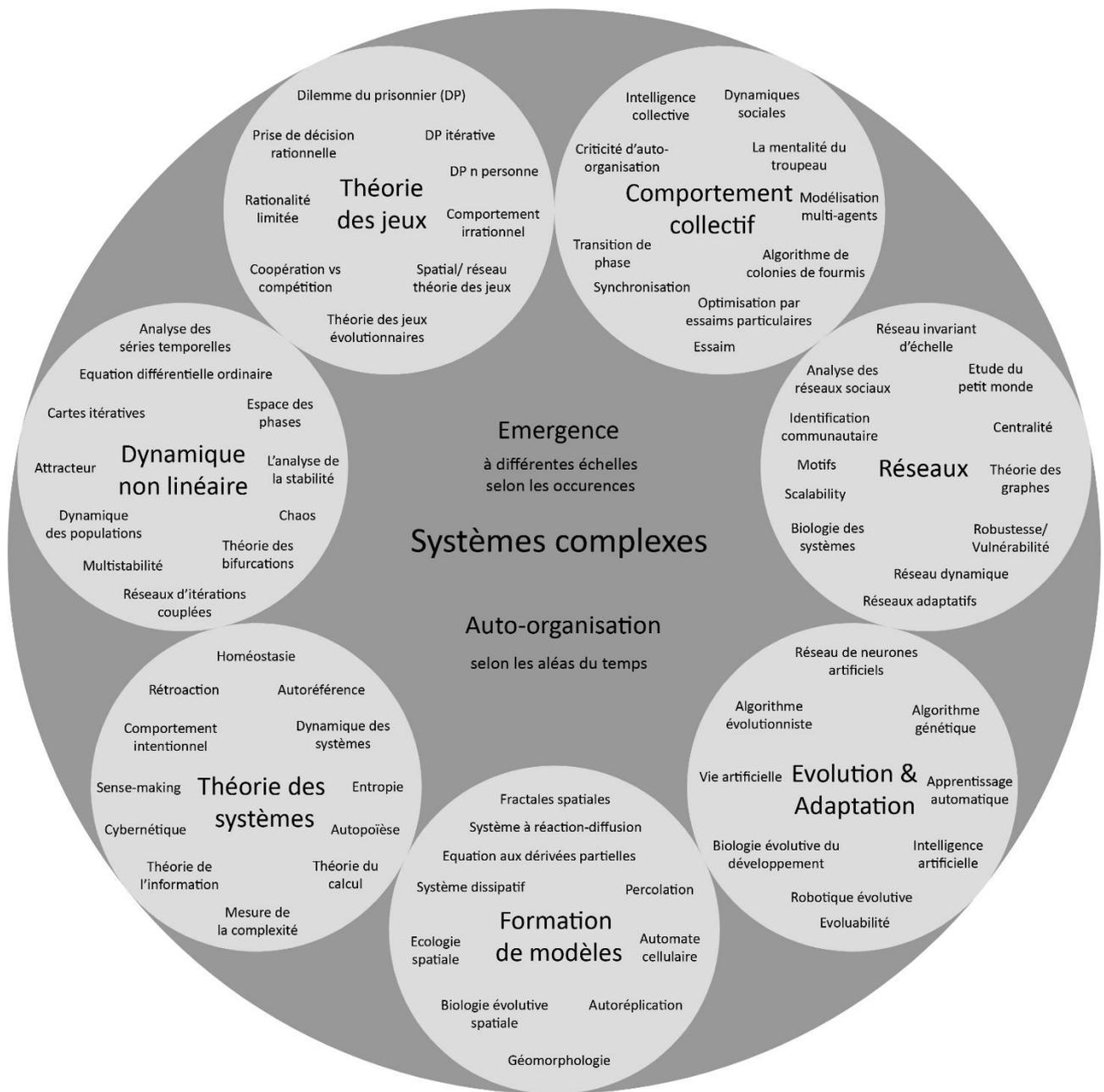


Figure 1.11 Les sujets à l'œuvre dans les « systèmes complexes », avec des sujets comme l'émergence, l'auto-organisation, le comportement collectif, l'évolution, font tous l'objet d'investigations poussées afin de mieux appréhender leur nature. (Schéma original créé par Hiroki Sayama traduit par nos soins), Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems, publication prévue en 2015, p.5

Notre démarche est un peu similaire. Au début de ce travail, chaque projet ne présentait qu'une petite partie de l'iceberg. Ce n'est qu'à partir d'une centaine de projets analysés que la compréhension générale de la production architecturale numérique s'est faite jour.

## 1.3 Tendances numériques dans l'architecture

### 1.3.1 Le rapport entre la science et l'architecture.

Il est très intéressant de noter qu'en 1887, Sir William Thomson a abordé le problème de l'ordonnement idéal de la structure de la mousse et décrit la conjecture de Kelvin qui a été reprise 121 ans plus tard par PTW Architects et utilisée dans leur projet « Water Cube » à Pékin en 2008. En 1945, le mathématicien John von Neumann (Theory of Self Reproducing Automata) étudie les automates cellulaires, modèles mathématiques qui se comportent comme des systèmes vivants, interférant les uns avec les autres et s'auto-reproduisant comme les cellules humaines, donnant naissance à des logiciels de simulation tels que Cellular Automata. 63 ans plus tard, Alisa Andrasek a repris cette notion et l'a appliquée dans son projet « CA04 ». En 1950, le chimiste russe Belousov découvre la réaction de Belousov-Zhabotinsky. Quelques soixante ans plus tard, en 2012, Dominik Strzelec emploie ce modèle pour sa recherche architecturale. Le biologiste Aristid Lindenmayer en 1968 met en avant la modélisation de la croissance des plantes qui influence les langages de programmation. 35 ans après, en 2003, Michael Hansmeyer se base sur ces recherches pour réaliser son projet « L-Systemes in Architecture ». On pressent un lien, une proximité entre ces découvertes et l'architecture, leur frontière est ténue. Toutefois, le développement en architecture apparaît souvent décalé, en retard par rapport à ces expérimentations scientifiques, et en plus, le résultat n'est toujours pas très satisfaisant. Si aujourd'hui, de plus en plus d'architectes empruntent des notions, des logiciels issus de la recherche scientifique, c'est souvent pour reproduire des formes extrêmement

compliquées qui ont peu de rapport avec l'architecture comme création de spatialité. Et si le mot architecture d'algorithme est devenu plus en plus à la mode et continue de fasciner bon nombre d'architectes son opérativité se limite souvent à du décor, du pur formalisme.

### 1.3.2 Questions à propos des projets de l'architecture numérique

Ces emprunts à la science, les mises au point de scripts de plus en plus complexes posent la question de la maîtrise que l'architecte doit en avoir.

Ces emprunts relèvent pour partie de la fascination que certaines images comme celles produites par les fractales exercent d'emblée sur le regard. Intérêt qui n'est peut-être pas si éloigné de ce qui au XIXème siècle inspira l'architecture organique avec les recherches et relevés sur la nature ; on pense notamment aux planches de botanique de Ernst Haeckel. (Fig. 1.12)

La question se pose du niveau de connaissance et de la maîtrise des principes requis qui garantissent un usage non simplement décoratif de ces outils. Leur importation dans le processus de conception d'architecturale peut-elle avoir lieu sans préalable, sans condition ?

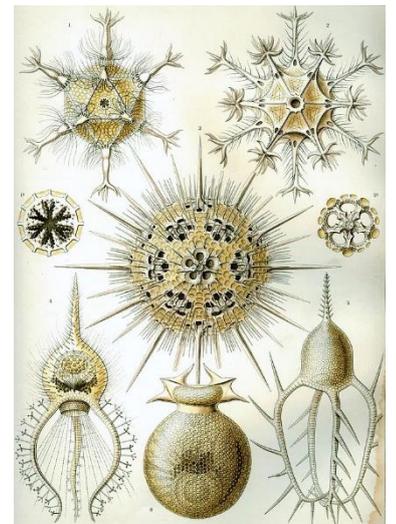


Figure 1.12 « Phaeodaria », Ernst Haeckel, *Art Forms in Nature*, New York, Dover Publications Inc, 2007, p.1 [1<sup>ère</sup> ed. Leipzig & Wien, Bibilographisches Institut, 1899-1904]

## **2. Projets réalisés à partir de l'algorithme non-linéaire**

### **2.1 Notions empruntées par les architectes se référant au système complexe**

Afin de saisir au mieux les enjeux liés à l'emploi de l'algorithme non linéaire en architecture, il nous semble important de donner une définition des principales notions en cours dans les systèmes complexes.

Ne disposant pas à ce jour du niveau de connaissance suffisant autorisant une connaissance parfaite de l'ensemble de ces notions, les définitions et explicitations données ci-après sont issues des ouvrages consultés figurant en marge du texte et répertoriés dans la bibliographie. L'aperçu donné dans ce chapitre s'est permis quelques simplifications voire vulgarisations, nous espérons ne pas avoir commis de contre sens.

Il nous a semblé, par ailleurs, important de ne pas exclure celles sur lesquelles subsistent de notre part des incompréhensions dans la mesure où elles fausseraient l'approche globale et systématique qui est le sujet de cette thèse.

Toutes les notions se référant aux systèmes complexes n'ont pas la même occurrence, ni le même usage. La plupart sont accompagnées d'une illustration de projet numérique se référant à la notion correspondante. Celles où ce n'est pas le cas présentent un intérêt avec le processus de conception du projet architectural.

## 1) Fractal

Le terme « fractale », inventé par Benoît Mandelbrot, regroupe un ensemble de notions mathématiques appliqué à la description de phénomènes naturels comme les nuages et les côtes maritimes. Le terme est dérivé du latin « *fractus* », qui signifie « brisé ». La théorie fractale propose des méthodes pour décrire l'irrégularité inhérente des objets naturels, comme certains phénomènes spatiaux ou temporels continus et non différentiables. Dans l'analyse fractale, la notion euclidienne de « longueur » est considérée comme un processus qui est caractérisé par un constante  $D$  connu comme la dimension Hausdorff ou la dimension fractale.<sup>20</sup> Ce sont des concepts centraux de cette nouvelle géométrie. Cette dernière donne une indication de la façon dont une fractale particulière peut remplir l'espace pendant que le microscope zoome à des échelles de plus en plus fines. Un autre concept important de la géométrie fractale est l'autosimilarité. Les mêmes formes et les mêmes modèles se retrouvent à des échelles de plus en plus petites.<sup>21</sup>



Figure 2.1 Michael Hansmeyer, *Subdivided Columns*, 2010

En architecture, de nombreux projets réalisés ou seulement virtuels empruntent à la notion de fractale ; le chapitre 3 ci-après présente certains exemples s'y référant, et le fait de même pour l'ensemble des notions abordées ici. (Fig. 2.1)

20. Willi-Hans Steeb, *Nonlinear Workbook: Chaos, Fractals, Cellular Automata, Neural Networks, Genetic Algorithms, Gene Expression*, New Jersey, World Scientific, 2008, p.222

21. Jane Burry, Mark Burry, *Mathématiques et architecture*, Arles, Actes Sud, 2010, p.257, trad. Fr. de Bruno Marmioli, [ÉO. Londres, Thames & Hudson Ltd, 2010]

## 2) Système à réaction-diffusion

Un système à réaction-diffusion est un modèle mathématique élaboré pour décrire des réactions chimiques dans lesquelles, dans une première étape à un niveau local, différentes substances se transforment, suivie par un processus de diffusion qui dissémine ces substances dans l'espace.<sup>22</sup>

22. Alan M. Turing, « *The Chemical Basis of Morphogenesis* », *Biological Sciences*, vol.237, no.641, août 1952, p.38

Ces systèmes, dont le domaine d'application initial est la chimie, peuvent aussi décrire des phénomènes dynamiques naturels appréhendés en biologie, en physique, en géologie.

En architecture, le système à réaction-diffusion permet de créer des structures en 3D d'une grande porosité, ce qui attiré l'intérêt de nombreux architectes. (Fig. 2.2)

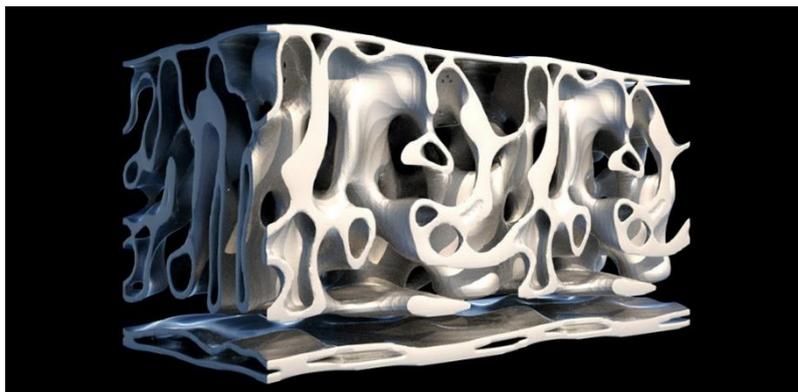


Figure 2.2 Michael Hansmeyer, *Voxel-based Geometries: Reaction-diffusion form*, 2009

## 3) Automate Cellulaire

Un automate cellulaire consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » choisi parmi un ensemble fini qui a la possibilité d'évoluer au cours du temps. L'état d'une cellule au temps  $t+1$  est fonction de l'état au temps  $t$  d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage ». A chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont

appliquées simultanément à toutes les cellules de la grille, produisant ainsi une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente.<sup>23</sup>

23. Stephen Wolfram, *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p.24

La principale caractéristique des automates cellulaires tient dans la simplicité des règles locales qu'elle emploie et la complexité à laquelle elle peut parvenir au niveau global. (Fig. 2.3)

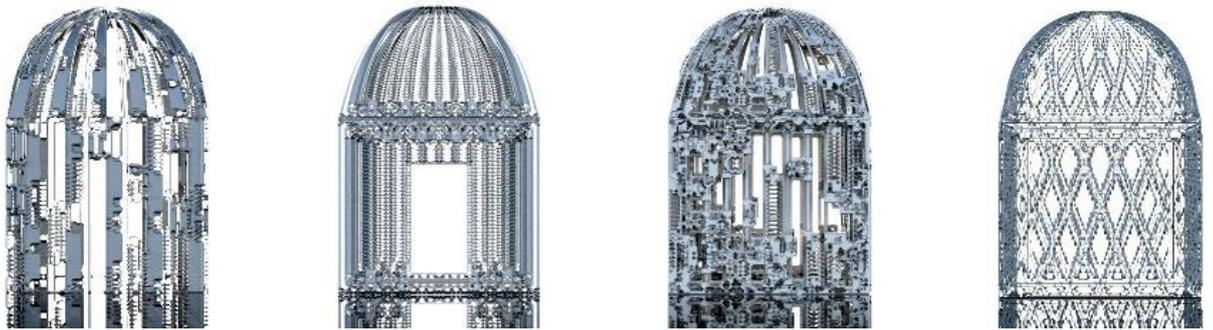


Figure 2.3 Michael Hansmeyer, *Voxel-based Geometries: Cellular Automata*, 2009

#### 4) L'algorithme évolutionniste

Selon C. Darwin, les mécanismes d'évolution des êtres vivants sont soumis à la compétition qui sélectionne les individus les mieux adaptés à leur environnement. Les caractéristiques « utiles » des parents sont transmises aux enfants. Les algorithmes évolutionnistes sont une famille d'algorithmes s'inspirant de la théorie de l'évolution pour résoudre des problèmes divers. Le terme « Evolutionary Computation », apparu en 1993 pour la première fois dans le titre d'un nouveau journal publié par MIT Press, a été largement adopté pour désigner toutes les techniques se réclamant plus ou moins métaphoriquement de la théorie de l'évolution biologique.<sup>24</sup>

24. Johann Dréo, Alain Petrowski, Éric Taillard, Patrick Siarry, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Eyrolles, Paris (2003), p.76

L'ingénierie industrielle utilise souvent l'algorithme évolutionniste pour aboutir à des structures optimisées comme par exemple le Shinkansen, train à grande vitesse en service au Japon. En architecture, ces algorithmes sont exploités comme outil de générateur des formes. (Fig. 2.4)



Figure 2.4 Philippe Morel, Felix Agid, Jelle Ferniga, Model Chair T1-M, 2010

## 5) Système multi-agents

Un système multi-agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations. Les agents sont autonomes, chacun dispose d'une intelligence artificielle. En informatique, un système multi-agents peut résoudre des problèmes qui ne peuvent être solutionnés par un système linéaire. <sup>25</sup> En architecture, la capacité morphogénétique de ce système a de manière récente retenu l'attention des architectes. Comme les agents fonctionnent au niveau « local », à l'échelle de chacun d'eux,

25. FERBER Jacques, *Les Système Multi-agents, vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions, 1995, p. 12-17

les formes générées au niveau « global » sont souvent imprédictibles. Cette méthode de modélisation s'appelle aussi « modélisation de multi-agents ». De nombreux projets expérimentaux ont été réalisés de la sorte. (Fig. 2.5)



*Figure 2.5 Roland SNOOKS, Cliff House, 2012*

## 6) Intelligence collective

L'intelligence collective est une intelligence qui émerge de la collaboration de travaux collectifs. Un groupe d'humains ou d'animaux possède une intelligence collective quand ils collaborent. Aujourd'hui, avec l'essor de l'intelligence artificielle, l'intelligence collective existe non seulement dans la vie réelle mais aussi sous forme virtuelle. Par exemple, le système multi-agents (Cf. 2.1.5) peut être considéré comme un système qui a une intelligence collective. Cette intelligence est créée par la collaboration d'agents intelligents artificiels.

La notion d'intelligence collective artificielle est présentée dans le chapitre consacré au système multi-agents, l'intelligence collective humaine donnera lieu à un développement particulier au chapitre 3.1.6. (Fig. 2.6)



Figure 2.6 Jose SANCHEZ, BLOCK, 2014

## 7) Algorithme de colonies de fourmis

Les algorithmes de colonies de fourmis appartiennent aux métaheuristiques<sup>26</sup> récemment proposées pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile. Ces algorithmes s'inspirent de comportements collectifs comme celui des colonies de fourmis observées au moment du dépôt des nourritures glanées et dans le suivi des pistes qu'elles empruntent. Une colonie d'agents simples (les fourmis) communiquent indirectement via des modifications dynamiques de leur environnement (les pistes de phéromones) et construisent ainsi une solution à un problème en s'appuyant sur leur expérience collective.<sup>27</sup>

26. Les métaheuristiques sont des algorithmes d'optimisation, visant à résoudre des problèmes d'optimisation complexe. Les algorithmes évolutionnistes, le « recuit simulé\* » les algorithmes de colonies de fourmis, les algorithmes d'optimisation par essaims particuliers, la recherche avec tabous font tous parties de métaheuristiques.

BIANCHI Leonora, DORIGO Marco, GAMBARDILLA Luca Maria, GUTJAHR Walter J., « A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization », *Natural Computing: an international*, vol 8 (2), Juin 2009, p.239

(\*méthode empirique inspirée du processus métallurgique qui alterne les cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui ont pour effet de minimiser l'énergie du matériau. Cette méthode est transposée en optimisation pour trouver les extrema d'une fonction).

Pour mieux expliquer le mécanisme d'algorithme de colonies de fourmis, il est nécessaire synthétiser de façon concise et limpide le comportement des fourmis :

- une fourmi quête la nourriture qu'elle rapporte de façon aléatoire autour de sa colonie ;
- elle laisse des traces de phéromones sur son chemin de retour ;
- les autres fourmis seront attirées par les phéromones et auront tendance à s'approcher de ce chemin ;
- entre plusieurs pistes qui peuvent se rejoindre là où transite la nourriture, la piste plus courte sera parcourue par le plus grand nombre de fourmis, et sera donc de plus en plus chargée par les phéromones ; les pistes les moins « optimisées » seront finalement abandonnées.

En architecture, cet algorithme est non seulement intéressant en tant que méthode d'optimisation mais aussi parce qu'outil de morphogénèse. En conservant la trace des « pistes » parcourues et en leur conférant épaisseur ou couleur, il est possible d'obtenir une membrane en 2D ou 3D qui s'apparente à un plan de circulation d'une ville ou d'un bâtiment dans lesquelles circulations principales et circulations secondaires sont clairement matérialisées et différenciées. (Fig. 2.7)

## 8) Optimisation par essais particuliers

L'optimisation par essais particuliers (PSO, particle swarm optimization) est une métaheuristique d'optimisation, inventée par Russel Eberhar et James Kennedy en 1995,

27. Johann Dréo, Alain Petrowski, Éric Taillard, Patrick Siarry, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Eyrolles, Paris (2003), p.115



Figure 2.7 Anthill Art, Fire Ant Colony, 2013

inspirée par le comportement social d'une nuée d'oiseaux ou d'un banc de poissons<sup>28</sup>. Dans la nature, le comportement collectif est souvent un moyen d'assurer la protection du groupe.

28. Kennedy, J. and Eberhart, R. C. Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ. p. 1942-1948, 1995*

Les règles de PSO sont :

- initialiser un groupe de particules qui possède 3 paramètres : un nombre défini de particules, une position initiale aléatoire de chaque particule, une vitesse initiale aléatoire de chaque particule ;
- évaluer le taux d'adaptation de chaque particule ;
- comparer son taux d'adaptation actuelle avec ses taux d'adaptations historiques pour ne retenir que la meilleure ;
- comparer son taux d'adaptation actuelle avec ceux de son voisinage, historiques pour ne retenir que le meilleur ;
- ajuster la position et la vitesse de chaque particule ;
- si l'objectif visé n'est pas obtenu, revenir sur l'étape 2.<sup>29</sup>

29. *Ibid*

Ce domaine est très lié avec « Essaim », par contre, l'objectif de PSO est plus un outil d'optimisation qu'un générateur de forme, ce qui explique sans doute son peu de succès en architecture.

## 9) Essaim

Essaim étudie le comportement collectif de groupes d'animaux de même espèce. Ce terme est souvent appliqué à des insectes qui migrent ou se déplacent tous ensemble dans le même sens. Les oiseaux (Fig. 2.8) ou poissons ont aussi des comportements collectifs similaires.

Le phénomène d'essaim a été simulé pour la première fois sur ordinateur en 1986 par le programme « Boids »<sup>30</sup>. Des agents sont codés pour suivre des règles simples, ce programme a été créé au début pour étudier les nuées d'oiseaux en vol mais il peut aussi être utilisé pour expliquer le mécanisme des bancs de poissons ou tout autre phénomène d'essaim dans la nature.

Le projet Emergent Porosity par Joseph A. SARAFIAN de l'université de Southern California (Fig. 2.9) utilise un algorithme similaire à celui de « Boids » générant une forme semblable aux nuées d'oiseaux en vol. Par contre, ici, chaque « oiseau » ou « agent » est un élément architectural.



Figure 2.9 Joseph A. Sarafian, Emergent porosity, 2011

Par opposition aux recherches sur l'algorithme de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaims particulaires, l'étude d'essaim se focalise plus sur la compréhension et la simulation du comportement collectif que sur l'optimisation d'un problème particulier. Dans l'architecture, cette notion a été très souvent utilisée pour générer des objets purement formels.

30. KENNEDY James, EBERHART Russell, « Particle Swarm Optimization », *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, 1995*



Figure 2.8 Flocage des stariques, photo D. Dibenski, 1986

## 10) Théorie des graphes

« En mathématiques, l'étude des graphes permet de représenter des relations entre certains objets par un ensemble de sommets ou de nœuds et par un ensemble d'arêtes qui relient par paires les nœuds. Les graphes peuvent être non orientés ; dans ce cas, il n'y a pas de distinction faite entre les deux nœuds reliés par une arête. Les bords peuvent être reliés d'un nœud à l'autre. Leur qualité essentielle représentée est la connectivité : les graphes n'ont pas d'échelle et sont ne sont pas métriques. La discipline est née en 1736 lorsque Leonhard Euler a publié son document sur les sept ponts de Königsberg et établi la preuve de l'inexistence d'une route autour de la ville qui ne traverse chaque pont qu'une seule fois. »<sup>31</sup>

La théorie des graphes, dans certains cas, peut générer des espaces aux dimensions supérieures. Les exemples les plus connus : le ruban de Möbius (Fig. 2.10) et la bouteille de Klein (Fig. 2.11), qui rejoignent ainsi -mais en dimension 1- les recherches de la topologie et des caractéristiques de certains objets à n dimensions renfermant une dimension n+1.

Dans le projet « Klein Bottle House », 2008, l'architecte Rob McBride s'inspire de la bouteille de Klein, pour créer une maison où dedans et dehors se confondent (Fig. 2.12).

31. Jane et Mark Burry, *Mathématiques et architecture*, Actes Sud, 2010, p.265

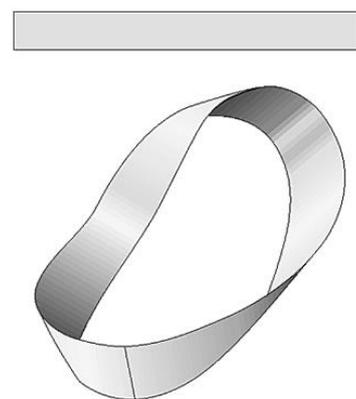


Figure 2.10 Le ruban de Möbius



Figure 2.11 La bouteille de Klein

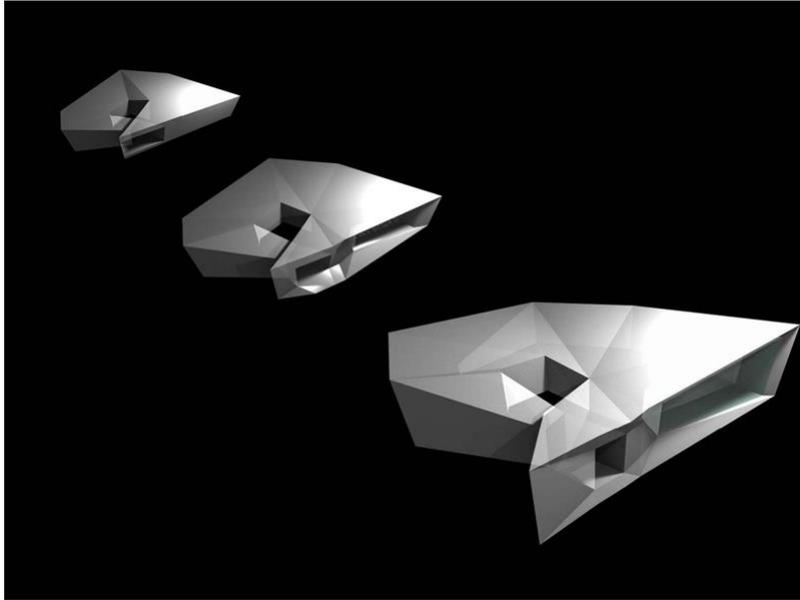


Figure 2.12 McBride Charles Ryan, Klein Bottle House, 2008

## 11) Vie artificielle

En général, la vie artificielle est une interdiscipline qui étudie tous les systèmes liés à la vie, par des simulations de modèle informatique, robotique voire biochimique. Cette discipline a été créée en 1986 par Christopher Langton, informaticien américain. Il existe trois approches dans cette discipline<sup>32</sup> :

- « soft »<sup>33</sup> par la simulation de la vie artificielle dans un logiciel ;
- « hard »<sup>34</sup> par la mise au point de robot dupliquant certains caractères ou fonctions empruntés à la vie animale ;
- « wet » par la création d'ADN en biochimie.

En architecture, les recherches se développent plutôt autour des deux premières approches « soft » et « hard ».

L'automate cellulaire explicité au chapitre 2.1.3 a tôt été étudié parmi toutes les recherches de vie artificielle donnant lieu à la mise au point de programmes comme « game of life », « Langton's ant » ;

32. Robert A. Wilson et Frank C. Keil, *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, The MIT Press, p.37

33. Maciej Komosinski et Andrew Adamatzky, *Artificial Life Models in Software*, 2009, Springer.

34. Andrew Adamatzky et Maciej Komosinski, *Artificial Life Models in Hardware*, 2009, Springer.

En robotique, les machines sont de plus en plus capables de réaliser des missions complexes.

L'application la plus connue est l'aspirateur robotique (Fig. 2.13). Malgré un niveau d'intelligence artificielle bas (par rapport aux robots des films science-fiction possédant une intelligence artificielle sophistiquée), ces robots sont capables de réaliser certaines missions de manière totalement autonome.

Le projet Flight Assembled Architecture (Fig. 2.14), 2008, de Gramazio et Kohler est une installation réalisée par des robots volants programmés pour construire automatiquement des structures. Les briques sont ainsi transportées et déposées une par une à leur position précise par des drones préprogrammés. Comme cette approche de la vie artificielle est essentiellement focalisée sur le processus de fabrication, le « modus operandi » et n'aborde que peu ou pas le processus de morphogénèse, elle ne sera pas plus développée dans cette thèse.



Figure 2.13 Un aspirateur robotique

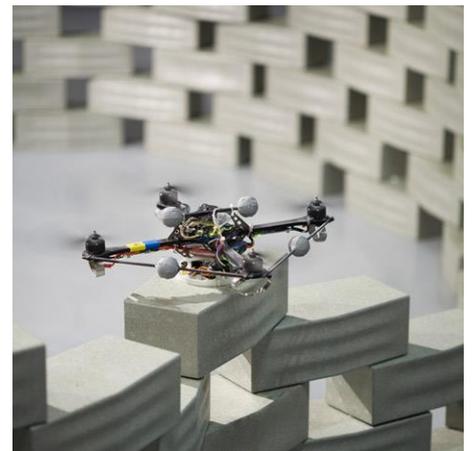


Figure 2.14 Gramazio & Kohler et Raffaello D'Andrea, *Flight Assembled Architecture*, 2011

## 12) Biologie évolutive du développement

La biologie évolutive du développement (Evo-dévo, evolutionary developmental biology en anglais) est une discipline apparue en biologie au cours des années 80. Elle s'emploie à identifier les mécanismes cause d'évolution dans les phénotypes des organismes<sup>35, 36</sup>.

Cette discipline permet de comparer les processus d'évolution des espèces et d'observer les liens phylogénétiques qui existent entre elles. En somme, elle permet d'observer l'évolution du développement des organismes. Elle recherche l'origine et l'évolution du

35. Gerd B. Müller, « Evo-devo: extending the evolutionary synthesis », *Nature Reviews Genetic* 8, p.943-949

36. Brian K. HALL, *Evolutionary Developmental Biology*, Springer, 1999, p.67

développement embryonnaire et analyse les changements dans les processus d'évolution qui permettent la création de nouveauté chez les espèces. L'« évo-dévo » montre donc comment l'évolution peut altérer certains mécanismes biologiques et créer ainsi de nouveaux caractères ou de nouvelles structures à partir de gènes déjà existants.



Figure 2.15 Jorge AYALA, *Le Cabinet de Curiosités Post-Digitales*, 2014

Le Cabinet de Curiosités Post-Digitales (Fig. 2.15) est l'installation de Jorge Ayala pour la FRAC Orléans en 2013. L'architecte a classé différents scripts sous la forme du tableau périodique des éléments chimique de Mendeleïev. Par exemple, il y a (Ca) « Catalyseurs », (Ep) « Epidermes synthétiques », (Ex) « Exosquelettes », (Cr) « Cristaux ». Ces éléments ont chacun leur propre fonction. Et on peut se demander si au lieu d'être des éléments chimiques, ils ne sont pas plutôt le résultat de processus biologiques altérés. Expérience qui n'est pas sans rappeler l'œuvre de Karl Ernst Von Baer. (Cf. p.23)

### 13) Intelligence artificielle

Créé par John McCarthy, le terme « intelligence artificielle » est souvent abrégé par le sigle « AI » (Artificial Intelligence). L'auteur en donne la définition suivante : *« AI concerne la manière dont une machine décide comment atteindre les objectifs fixés sous certaines conditions d'information et capacités de calcul. À cet égard, elle est proche de la programmation linéaire... Toutefois, les problèmes que nous souhaitons résoudre à l'aide de l'AI sont souvent très différents. La question clé pour décrire l'AI est d'identifier les problèmes qui exigent de l'intelligence dans leur résolution et les méthodes disponibles pour y parvenir. Par exemple, le rôle des patterns matching, de recherche et d'apprentissage à partir de l'expérience... »*<sup>37</sup>

Marvin Lee Minsky, un autre de ses créateurs, la décrit comme *« la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui, pour l'instant, sont accomplies de façon plus satisfaisantes par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique »*.<sup>38</sup>

L'« intelligence » dans ce cas est perçue comme ce qui peut imiter le comportement humain ou lui suppléer.

C'est Turing à travers son test célèbre qui donne sans doute une perception tangible de l'IA. Pour lui, *« une machine est intelligente si on ne peut la distinguer d'un être humain lors d'une conversation. L'expérience consiste à mettre un expérimentateur devant un terminal informatique et à le relier soit à un autre opérateur humain soit à un ordinateur. L'opérateur et l'ordinateur prétendent tous les deux qu'ils sont des humains. Au travers d'un dialogue,*

37. John McCarthy, *Defending AI Research A Collection of Essays and Reviews*, Stanford, CSLI Publications, 1996, p.39

38. Marvin Lee Minsky, *Computation: Finite and Infinite Machines*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc, 1967

Et Bruno Bouzy, *Intelligence Artificielle Introduction*, Université Paris Descartes, URL: <http://web.mi.parisdescartes.fr/~bouzy>

*l'expérimentateur doit décider si son interlocuteur est un humain ou une machine. S'il ne peut faire cette distinction ou s'il n'indique la bonne réponse que dans la moitié des cas, on peut dire que la machine a passé le test avec succès et on la qualifiera d'intelligente. Il faut noter que, pour une machine, être considérée comme intelligente revient à imiter le comportement d'un humain et ne repose pas sur des critères intrinsèques. L'intelligence serait donc le fait des individus isolés et non des groupes, puisqu'en aucun cas on ne demande à une machine (ou à un groupe de machines) de se mettre à la place de plusieurs personnes ».*<sup>39</sup>

39. FERBER Jacques, *Les Systèmes Multi-agents, vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions, 1995, p. 5

Ce test est aujourd'hui porté à l'écran dans le film de Morten Tyldum « *Imitation game* ». <sup>40</sup>

40. TURING Alan M., « *Computing Machinery and Intelligence* », *Mind, New Series*, vol.59, no.236, octobre 1950, p.433



Figure 2.16 Minimaforms, *Becoming Animal*, 2011

#### 14) Système dissipatif

Un système dissipatif est un système qui fonctionne dans un environnement avec lequel il échange de l'énergie et de la matière. La structure dissipative maintient sa structure en

équilibre grâce à un échange d'énergie, de matière et d'entropie. Cette notion a été créée par le physicien, chimiste belge Ilya Prigogine qui a reçu le prix Nobel de chimie en 1977.<sup>41, 42</sup>

Dans la physique classique où l'environnement est clos, on considère qu'un système n'est stable que quand il a une énergie minimale, dans le cas contraire il consumera de l'énergie, produira de l'entropie et se verra ainsi déstabilisé. Dans la théorie des systèmes dissipatifs, un système ouvert peut conserver sa stabilité tout en absorbant l'énergie ou la matière de son environnement, et diffusant de l'entropie qui rend son environnement instable.

La réaction de Belousov-Zhabotinsky est un exemple d'un système dissipatif. (Fig. 2.17)



Figure 2.17 Dominik STRZELEC, Am Ostbahnhof Berlin Hackerspace, 2012

41. PRIGOGINE Ilya, NICOLIS G., *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, New Jersey, John Wiley & Sons, 1977

42. PRIGOGINE Ilya, *Thermodynamics of irreversible processes*, New York, Interscience Publishers (John Wiley & Sons Inc), 1968, 164 p. [1<sup>ère</sup> ed. Springfield, Charles C Thomas Publishers, 1955]

## 15) Autoréplication

L'autoréplication est une notion inventée par John von Neumann pour évoquer une machine capable de se reproduire en utilisant les matières se trouvant à sa portée dans son environnement. En informatique cette notion est très utilisée pour désigner la faculté des programmes y compris les virus à se dupliquer et se propager.

On trouvera de nombreuses manifestations de cette notion dans les projets d'architecture numérique qui se révèle cependant incapable de générer des formes spécifiques. (Fig. 2.18)

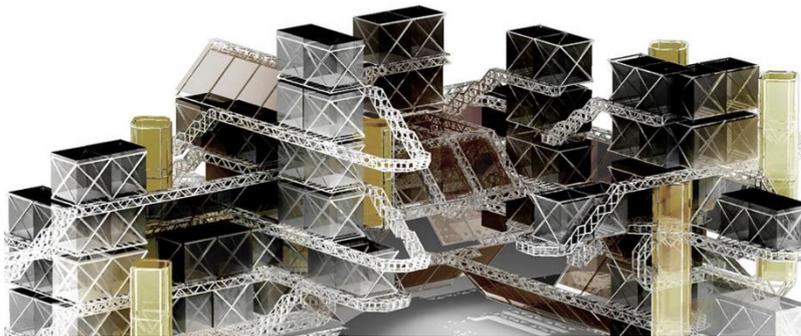


Fig 2.18 Michael Hansmeyer, *L-Systems in Architecture*, 2003

## 16) Géomorphologie

La Géomorphologie est une science qui a pour objet de la description et l'explication des formes du relief terrestre, et étudie particulièrement la lithosphère, les interactions entre l'atmosphère et l'hydrosphère, pour comprendre l'interconnexion de plusieurs systèmes de processus.<sup>43</sup>

43. Roe, Gerard H.; Whipple, Kelin X; Fletcher, Jennifer K. «Feedbacks among climate, erosion, and tectonics in a critical wedge orogen». *American Journal of Science*, vol.308, Septembre 2008. p. 815-842



*Figure 2.19 Dağhan Çam, Endemic Interstices – Phase 2, 2012*

Le projet Endemic Interstices (Fig. 2.19) de Dağhan Çam, Alexandre Kuroda, Karoly Markos et Ulak Ha, sous la direction d'Alisa Andrasek et Jose Sanchez essayent de simuler les processus de transformation dans la nature et créer des formes complexes. Son point de départ considère les fissures créées par l'assèchement des sols. Des questions comme la stabilité structurelle et la porosité donnent lieu à un développement propre grâce au recours du système multi-agents et explorer de la sorte la possibilité d'utiliser les ressources naturelles et donner à voir le caractère d'auto organisation de ces matériaux.

## 17) Rétroaction

A partir d'un processus simple qui considère un état initial A pour se poursuivre dans un état B, est appelée rétroaction le processus par lequel B valide ou invalide A. ce retour dite

boucle de rétroaction influe sur le résultat et en permet l'optimisation : l'effet précède la cause, on parle de causalité inversée.

Processus à l'œuvre dans la conception des projets architecturaux bien avant l'apparition de l'architecture numérique.

## 18) Autopoïèse

*« Une machine autopoïétique est une machine organisée comme un réseau de processus de production (transformation et destruction) de composants qui : (i) par leurs interactions et transformations en continu sont capables de régénérer et réaliser le réseau des processus (relations) qui les produit ; (ii) et constituent (la machine) comme une unité concrète dans l'espace dans lequel ces composants existent en spécifiant le domaine topologique de sa réalisation en tant que réseau. »<sup>44</sup>*

44. Humberto R. Maturana, Francisco J. Varela, *Autopoiesis and cognition: The Realization of the Living*, « Boston Studies in the Philosophy and History of Science », Kluwer Academic Publishers, 1980, p.78-79, (traduction personnelle)

L'autopoïèse (du grec auto soi-même, et poièsis production, création) est la propriété d'un système de se produire lui-même, en permanence et en interaction avec son environnement, et ainsi de maintenir son organisation malgré le changement de composants (structure).

Le concept d'autopoïèse tel que développé par Humberto Maturana et Francisco Varela dans l'article *Autopoietic Systems*, a été présenté en 1972 dans un séminaire de recherche à l'université de Santiago. Il vise notamment à définir l'être vivant, il rencontre depuis lors un succès théorique dans des domaines aussi divers que l'intelligence artificielle, les neurosciences, les sciences humaines.

Le projet « Archigram Revisited » (Fig. 2.20) est un projet de Minimaforms. Selon l'auteur, le projet a été généré par un système multi-agents où chacun d'eux peut être compris comme une machine autopoïétique. (Cf. Chapitre 3.15)



Figure 2.20 Minimaforms, Archigram Revisited, 2013

## 19) Théorie du Chaos

Les systèmes chaotiques affichent un certain nombre de caractéristiques générales. Ils sont non linéaires ; déterministes (plutôt que probabilistes, chaque événement étant déterminé par ce qui s'est passé avant, même si les événements peuvent sembler aléatoires) ; sensibles aux conditions initiales et témoignant d'une irrégularité importante, de l'ordre dans le désordre. Les systèmes chaotiques se caractérisent également par des motifs qui peuvent paraître similaires, mais qui ne se répètent jamais précisément. La compréhension moderne du chaos est largement attribuable à l'œuvre d'Edward N. Lorenz. Dans les années 1960, il a créé un modèle informatique simplifié qui représente les flux d'air responsables du climat. C'était un système récursif avec un certain nombre de variables et qui pouvait fonctionner une nuit entière. Lors de la tentative de

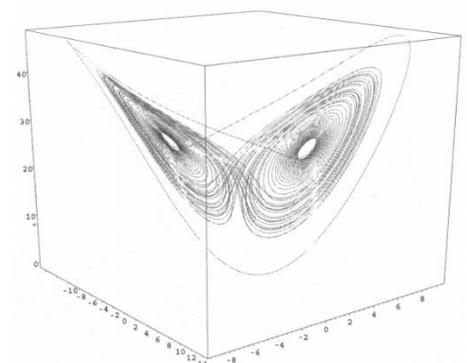


Figure 2.21 Warwick Tucker, Attracteur étrange de Lorenz, 2002

répétition d'un cycle particulier, Lorenz a découvert l'importance des petits changements des valeurs de départ (un problème avec son système avait provoqué un petit changement du nombre de décimales données à une valeur particulière de départ). Au cours des nombreuses itérations, le changement a entraîné une modification très importante du système.<sup>45</sup>

L'exemple typique d'images produites par la théorie du chaos est l'attracteur étrange découvert par Lorenz en 1963<sup>46</sup>. Il s'agit d'un attracteur qui montre comment les différentes variables du système dynamique évoluent dans le temps en une trajectoire non périodique (Fig. 2.21).

Le projet « Strange Attractor » de Mesne est un pavillon de dégustation de vins à South Eastern Victoria qui utilise -selon son auteur- « l'attracteur de Lorenz » comme un diagramme pour organiser et évoquer « une expérience spatiale de distance intime qui transforme la dégustation en une simulation à la consommation dans les restaurants »<sup>47</sup> (Fig. 2.22). Mais au vu du résultat, n'est-ce pas là invoquer des notions savantes pour cautionner une démarche hasardeuse et futile ?

## 20) Prise de décision rationnelle

« *La rationalité limitée n'est pas irrationnelle.* »<sup>48</sup>

Herbert Alexander Simon pointe ce phénomène que les multiples choix et décisions que chacun de nous est amené à prendre quotidiennement ne procèdent pas forcément et systématiquement d'un principe rationnel, à l'encontre de la théorie économique classique qui considère qu'un choix effectué par l'humain est toujours la solution optimisée

45. Jane et Mark Burry, *Mathématiques et architecture, Actes Sud, 2010, p.265*

46. Edward N. Lorenz, *Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atmos. Sci., vol 20, 1963, p. 130-141*

47. Jacobo Krauel, *Architecture et design contemporain: Conception et fabrication numériques, Links, 2010, p.200-203*

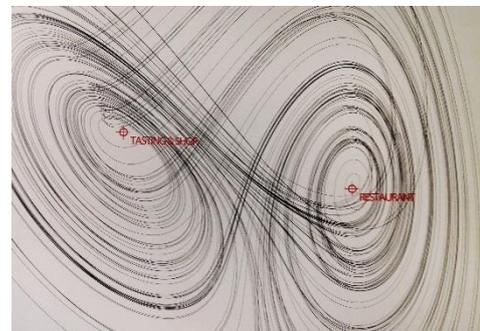


Figure 2.22 Diagramme du projet « Strange Attractor », Paul Nicholas, Tim Schork, Jerome Frumar, Scott Crowe, Matthew Macdonnell, *Strange Attractor, 2010*

48. Reinhard Selten, « What is Bounded Rationality », in *Bounded Rationality, The Adaptive Toolbox, Cambridge, MIT Press, 2002, p. 15*

parmi l'ensemble des possibilités qui s'offre à lui. Souvent, limité par la connaissance des choses, et la capacité cognitive, l'humain ne fait pas tout le temps le meilleur choix en face de plusieurs solutions.<sup>49</sup>

Le processus de conception architectural qui procède en permanence par décision et choix n'échappe pas à ce phénomène qui peut même se révéler aggravé et accéléré avec les algorithmes génératifs et l'avalanche de formes générées par leurs scripts. L'architecte dispose-t-il alors de tous les critères pour s'assurer du meilleur résultat ?

Ce que souligne Antoine Picon : « *Cherchant à justifier les formes qu'ils créent, les architectes numériques peuvent être tentés de les interpréter comme le résultat d'un processus d'émergence qui se suffit à lui-même.* »<sup>50</sup>

Certains au contraire persistent à prétendre que l'utilisation d'un algorithme génératif garantit la rationalité des choix mais n'y-a-t-il pas une rationalité limitée propre à ces scripts ?

49. Herbert Alexander Simon, *Models of Man Models of Man: Social and Rational Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*, New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 1957

Voir aussi Bryan D. Jones, « *Bounded Rationality* », *Annu. Rev. Polit. Sci.*, 1999. 2, p. 298

50. Antoine Picon, *Culture numérique et architecture : une introduction*, Basel, Birkhäuser, 2010, p.217

## 2.2 Fondement d'une taxinomie

L'architecture numérique a déjà fait l'objet de classification. Dans leur ouvrage « Naturaliser l'architecture »<sup>51</sup> Marie-Ange Brayer et Frédéric Migayrou ont proposé une classification constituée sur l'hypothèse de la réversibilité du naturel et de l'artificiel avec au cœur de leur problématique la mimesis. Dans son livre « New Computational Paradigms in Architecture »<sup>52</sup> Tom Verebes répertorie pour chaque parcelle du domaine architectural les impacts de la « révolution digitale » ; les chapitres de son ouvrage entendent souligner de manière explicite le « gap » marquant cette rupture : systèmes génératifs, analyse et rétroaction, synthèse et application, management, prototype et production. Dans « Mathématiques et architecture »<sup>53</sup>, la classification compilée par Jane et Mark Burry procède selon des notions scientifiques, mathématiques ou physiques mais la sélection de projets et les commentaires ne donnent pas à comprendre la véritable opérativité du numérique dans l'architecture : surfaces mathématiques et sérialité, chaos/complexité/ émergence, remplissage et pavage, optimisation, topologie, paysages statistiques et multi dimensionnalité. La classification proposée par Jacobo Krauel dans son livre « conception et fabrication numériques »<sup>54</sup> trop enfermée dans les catégories auxquelles elle a recours (fabrication, scripting, interactivité, poésie) ne favorise pas une perception globale du phénomène numérique.

Malgré l'intérêt évident des points de vue développés dans ces ouvrages, y fait défaut à notre avis une approche méthodique capable de situer dans son contexte les emprunts et apports faits aux sciences par l'architecture

51. BRAYER Marie-Ange (dir.), *Biothing* [Alisa Andrasek], catalogue de l'exposition présentée du septembre au novembre 2009, FRAC Centre, Orléans, Editions HYX, 2009

52. VEREBES Tom, LIU Yanchuan, XU Feng, *New Computational Paradigms in Architecture*, Beijing, Tsinghua University Press, 2012

53. BURRY Jane, BURRY Mark, *Mathématiques et architecture*, Arles, Actes Sud, 2010, trad. Fr. de Bruno Marmioli, [ÉO. Londres, Thames & Hudson Ltd, 2010]

54. KRAUEL Jacobo, *Architecture et design contemporain: Conception et fabrication numériques*, Barcelona, Links, 2010

numérique. C'est pour cela que nous proposons comme point de départ de ce répertoire qui se veut méthodique : l'algorithme et plus particulièrement l'algorithme non linéaire parce qu'il offre une complexité plus en phase avec les dernières expérimentations architecturales. Notre attention est essentiellement focalisée sur la morphogénèse des projets, c'est donc une approche partielle qui laisse de côté d'autres aspects liés à la sociologie, l'économie,...mais qui entend néanmoins aborder ce qui fait la substance de l'architecture.

Pour ce faire, une base de données a été élaborée petit à petit à partir des ouvrages de base, des sites internet propres aux architectes et chercheurs.

Elle regroupe à ce jour plus que 300 projets sur lesquels nous avons opéré une sélection pour n'en retenir que 70. Les critères d'exclusion :

- insuffisance d'information sur les manières de procéder, les notions de base pour la génération de la forme, les résultats,
- projets n'utilisant les outils informatiques que comme outils de représentation,
- variantes de projets à partir de même principe, projets similaires réalisés par le même auteur.

La quantité et la complexité des notions scientifiques utilisées par les architectes obligent également à restreindre notre analyse, j'ai cependant cherché à restituer de ces sujets écartés les rudiments.

Pour les projets, objets de la sélection présentée ici, nous sommes basés sur le diagramme d' Hiroki Sayama qui donne une vue méthodique et exhaustive des systèmes

complexes. Etant entendu que par définition les champs de recherche d'un système complexe sont multiples faits d'entrecroisement, de superposition, d'imbrication. Dans tous ces projets circulent un certain nombre de notions dont la fréquence, l'occurrence, la répétition finissent par les caractériser. Cette démarche a permis de les classer en 6 familles de dimensions inégales pouvant aller de 33 projets à 2. Le critère dominant n'étant pas tellement le nombre de projets mais bien la pertinence de ces familles quant à la morphogénèse des projets. Les projets sont ordonnés chronologiquement afin de conserver la temporalité propre à leur élaboration, sachant que la capacité de l'ordinateur et les outils développés par et pour les architectes ont beaucoup influencé l'orientation de ces recherches.

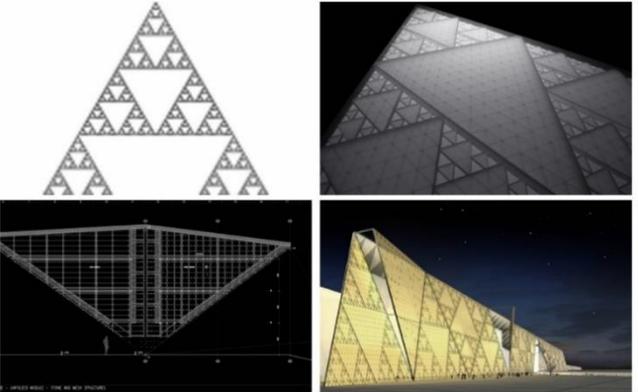
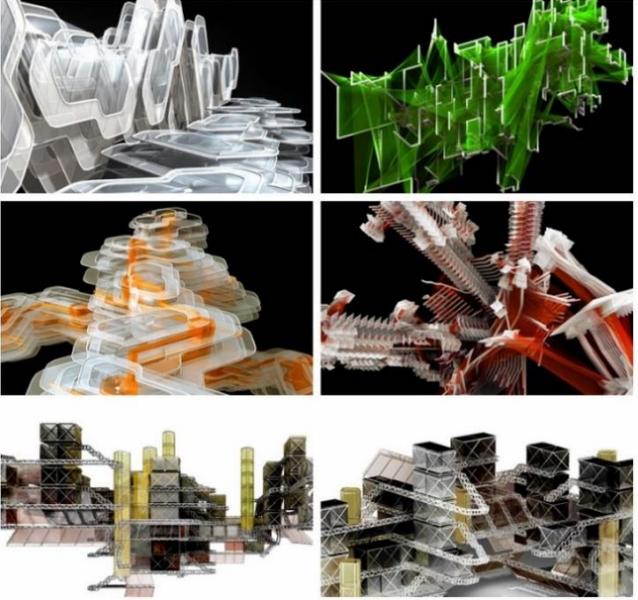
Cette classification ne peut être pas une classification ultime. De par le développement constant de ces domaines scientifiques, les sujets analysés ici sont sans doute appelés à évoluer, à se complexifier. Les recherches comme de la théorie de jeux, la théorie des systèmes, qui aujourd'hui génèrent peu de formes visuelles capables d'être saisies par les architectes revêtent néanmoins un intérêt certain pour l'architecture.

Cette classification entend participer d'une meilleure compréhension de l'architecture numérique d'aujourd'hui. Elle pointe toutefois certains procédés qui bien que communs et parfois très spectaculaires faussent le processus de design architectural.

Nous proposons d'organiser notre répertoire méthodique selon les catégories suivantes :

- Fractale
- Système à réaction-diffusion
- Automate cellulaire
- Algorithme évolutionniste
- Système multi-agents
- Intelligence collective

## 2.3 Collection des projets illustrant cette taxinomie

	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : Federation Square          Auteur :          Lab Architecture Studio          Année : 2003          Source :  <a href="http://www.labarchitecture.com/projects/federation%20square.html">http://www.labarchitecture.com/projects/federation%20square.html</a>  <b>[LABF03]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : The Grand Egyptian Museum          Auteur : Heneghan Peng Architects          Année : 2003          Source :  <a href="http://www.hparc.com/work/the-grand-egyptian-museum/">http://www.hparc.com/work/the-grand-egyptian-museum/</a>  <b>[HENG03]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : L-Systems in Architecture          Auteur : Michael Hansmeyer          Année : 2003          Source :  <a href="http://www.michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&amp;color=0">http://www.michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&amp;color=0</a>  <b>[MICL03]</b></p>



**Catégorie : Fractale**

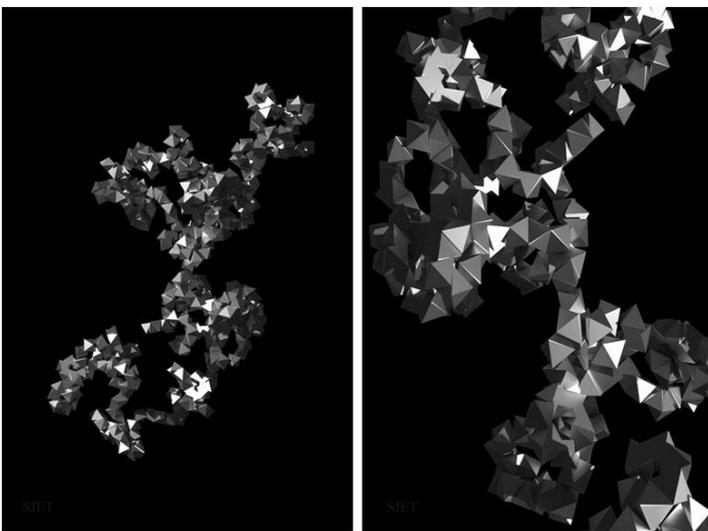
Projet : Subdivided Pavilions

Auteur : Michael Hansmeyer

Année : 2006

Source :

<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&color=0>  
**[MICS06]**



**Catégorie : Fractale**

Projet : Recursive Growth

Auteur : Sjet

Année : 2007

Source :

[http://sjet.us/PHILA\\_RECURSIVE\\_GROWTH.html](http://sjet.us/PHILA_RECURSIVE_GROWTH.html)  
**[SJER07]**



**Catégorie : Fractale**

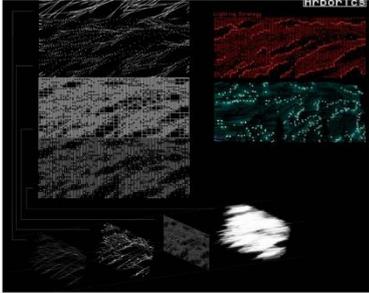
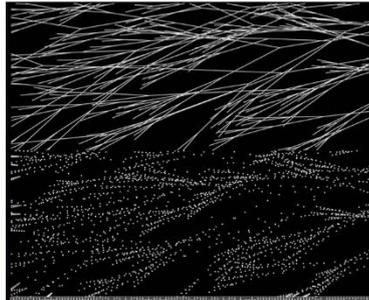
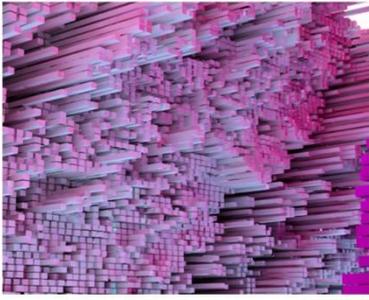
Projet : Platonic Solids

Auteur : Michael Hansmeyer

Année : 2010

Source :

[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html)  
**[MICP10]**



**Catégorie : Fractale**

Projet : Arborics

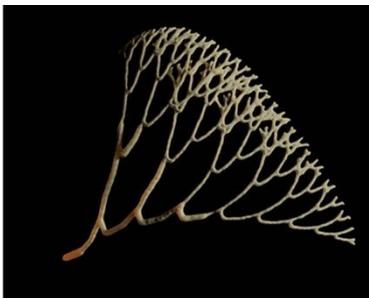
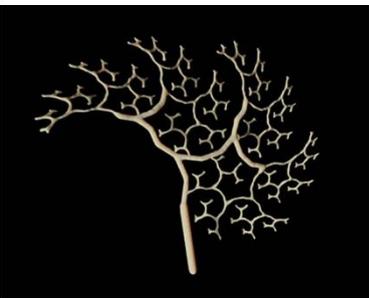
Auteur : Biothing

Année : 2009

Source :

<http://www.biothing.org/?cat=13>

[BIOA09]



**Catégorie : Fractale**

Projet : Roussel Recursions

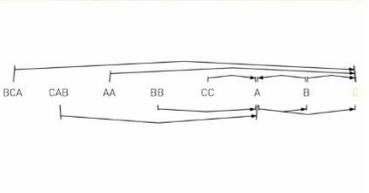
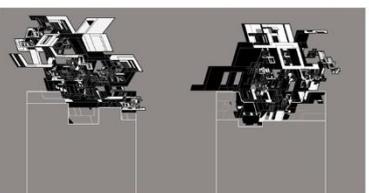
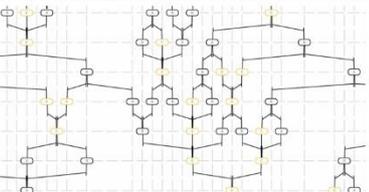
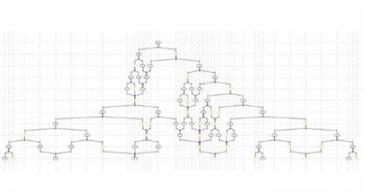
Auteur : Kokkugia

Année : 2009

Source :

<http://www.kokkugia.com/roussel-recursions>

[KOKR09]



**Catégorie : Fractale**

Projet : SuperMatter

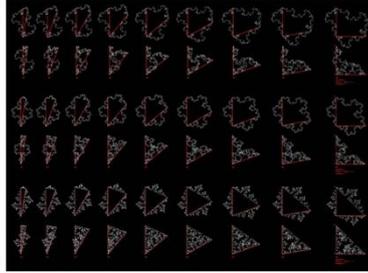
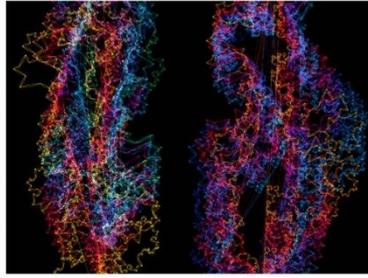
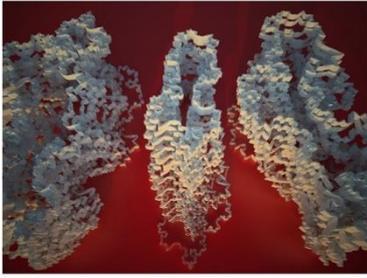
Auteur : Supermanoeuvre

Année : 2009

Source :

<http://supermanoeuvre.com/supermatter-sculptures/>

[SIPS09]



**Catégorie : Fractale**

Projet : a\_Maze

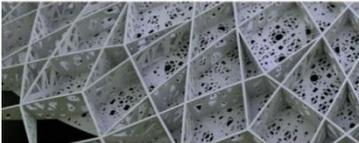
Auteur : Biothing

Année : 2010

Source :

<http://www.biothing.org/?cat=9>

[BIOA10]



**Catégorie : Fractale**

Projet : Le Louvre d'Abu Dhabi

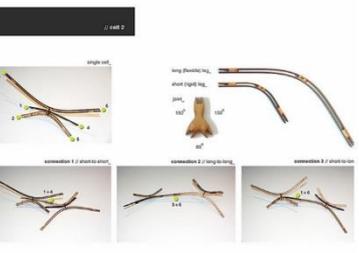
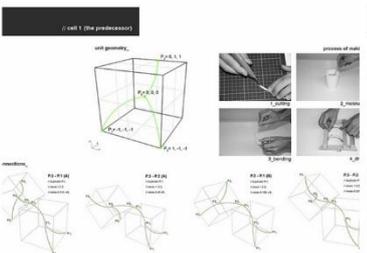
Auteur : Ateliers Jean Nouvel

Année : 2010

Source :

<http://www.jeannouvel.com/en/desktop/home/#/en/desktop/projet/louvre-abou-dabi>

[JEAL10]



**Catégorie : Fractale**

Projet : Fabware

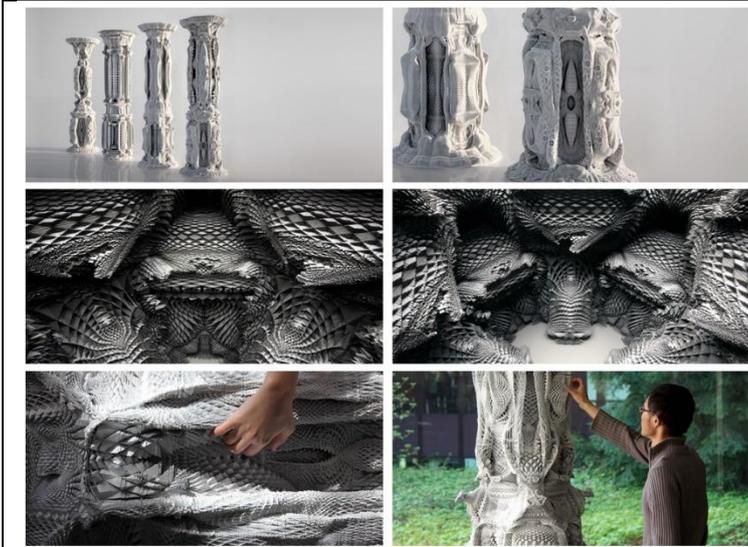
Auteur : Dağhan Çam

Année : 2010

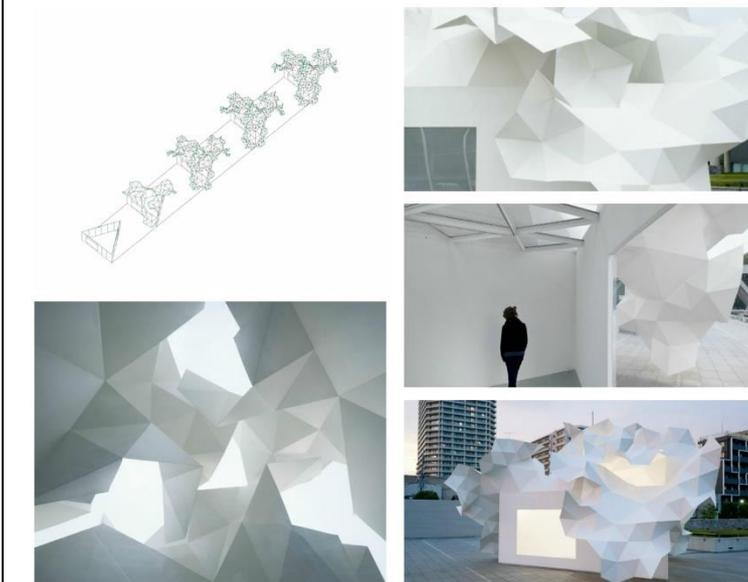
Source :

<http://daghancam.blogspot.fr/2011/01/fabware.html>

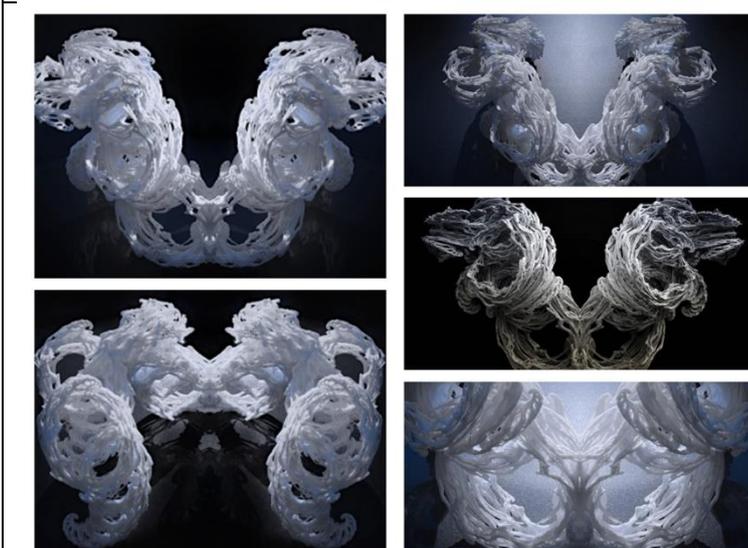
[DAGF10]



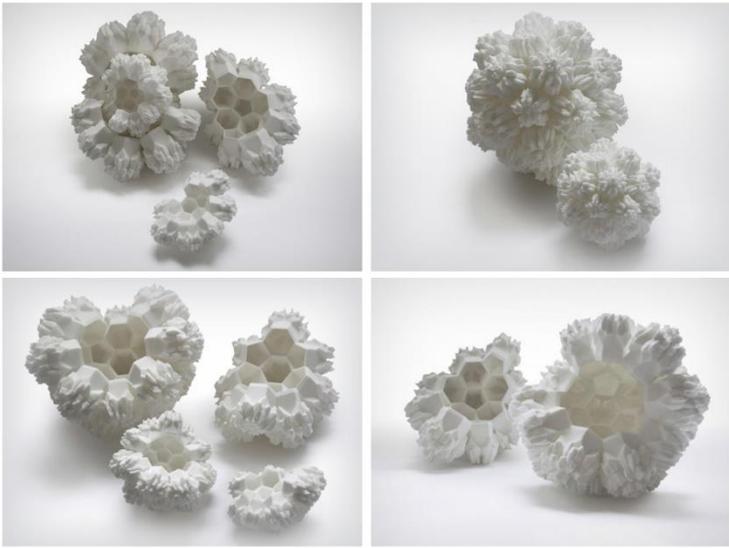
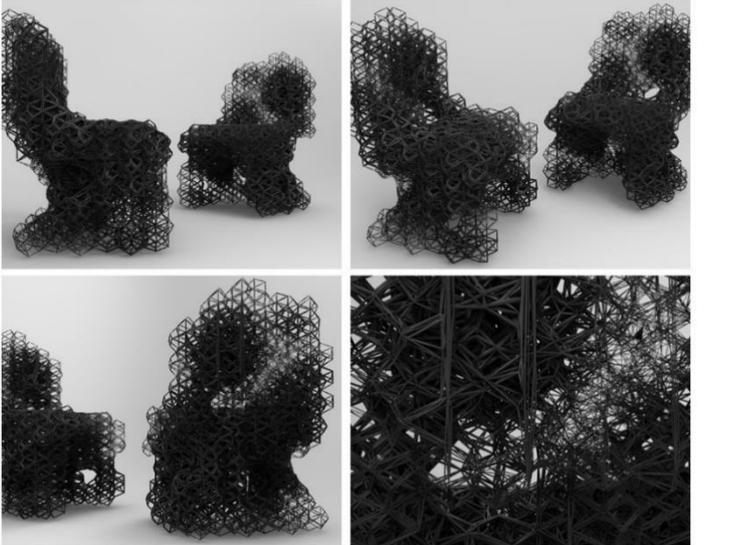
**Catégorie : Fractale**  
 Projet : Subdivided Columns  
 Auteur : Michael Hansmeyer  
 Année : 2010  
 Source :  
<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/columns.html>  
**[MICS10]**

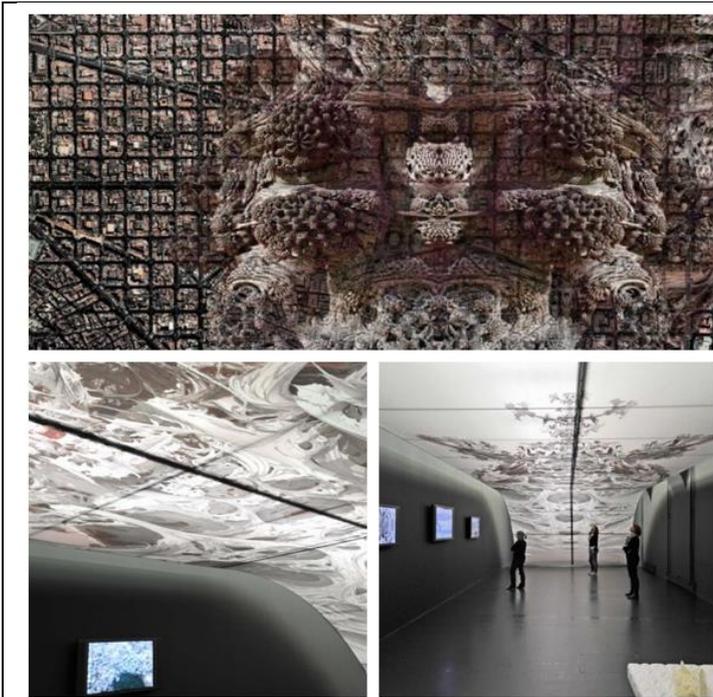


**Catégorie : Fractale**  
 Projet : Bloomberg Pavilion  
 Auteur : Akihisa Hirata  
 Année : 2011  
 Source :  
<http://www.hao.nu/project/bbg/bbg1.html>  
**[AKIB11]**



**Catégorie : Fractale**  
 Projet : Turbulence  
 Auteur : Nicolo Casas  
 Année : 2012  
 Source :  
<http://www.niccolocasas.com/TURBULENCE>  
**[NICT12]**

	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : FractalForms          Auteur : Daniel Widrig          Année : 2012          Source :  <a href="http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=FractalForms">http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=FractalForms</a>  <b>[DANF12]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : Degenerate Chair          Auteur : Daniel Widrig          Année : 2012          Source :  <a href="http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=Degenerate_Chair">http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=Degenerate_Chair</a>  <b>[DAND12]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Fractale</b>          Projet : De-Optimised Chair          Auteur : Daniel Widrig          Année : 2013          Source :  <a href="http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=DeOptimised_Chair">http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&amp;id=DeOptimised_Chair</a>  <b>[DAND13]</b></p>



**Catégorie : Fractale**

Projet : Formation

Auteur : SPAN

Année : 2010-2013

Source :

<http://www.archdaily.com/127503/formations-a-span-exhibition-at-the-mak-gallery/>

[SPAF13]



**Catégorie : Fractale**

Projet : Studies in Recursive Lattice

Auteur : EZCT

Année : 2013

Source :

<http://thibaultschwartz.com/?g1work=archilab-2013-w-ezctfrac-centre-2013>

[EZCS13]



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Microimage Software

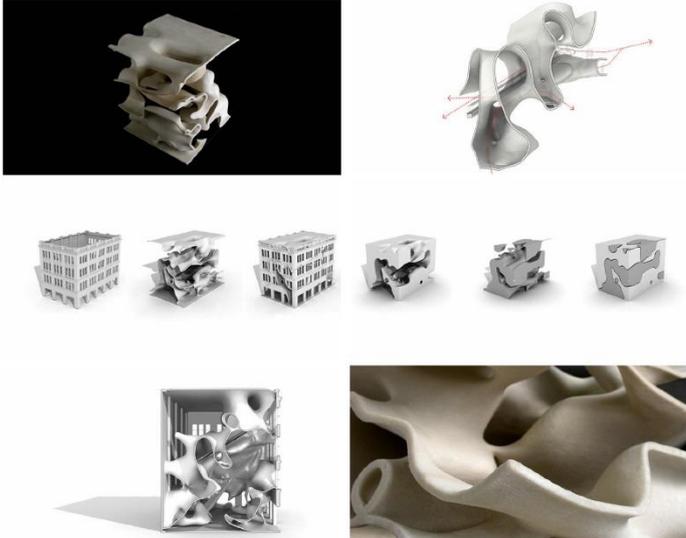
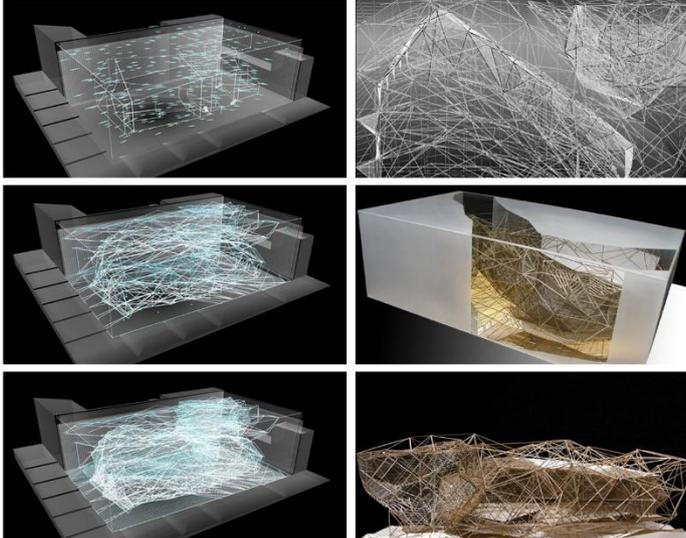
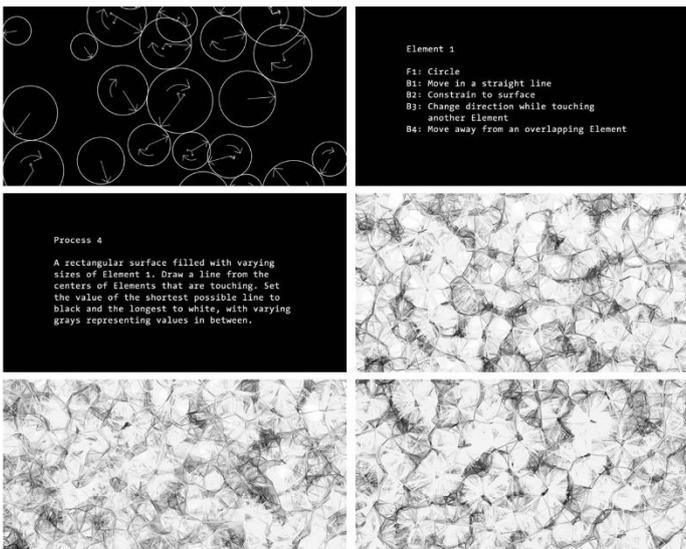
Auteur : Casey Reas

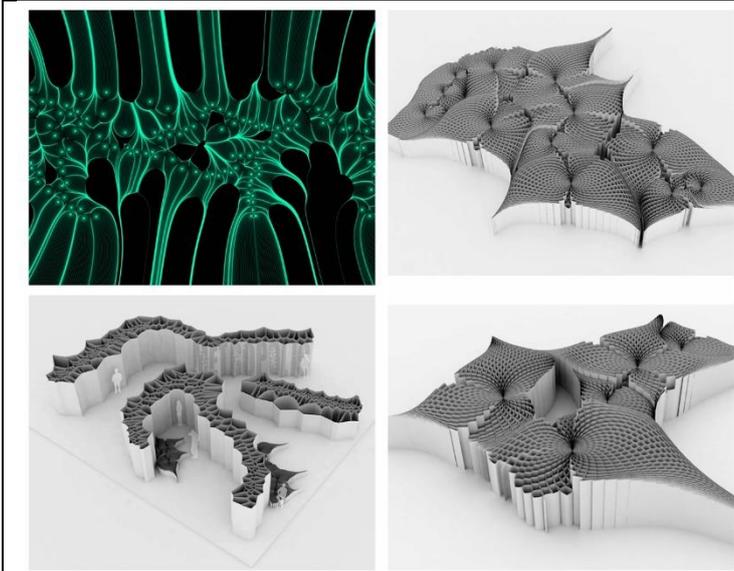
Année : 2002

Source :

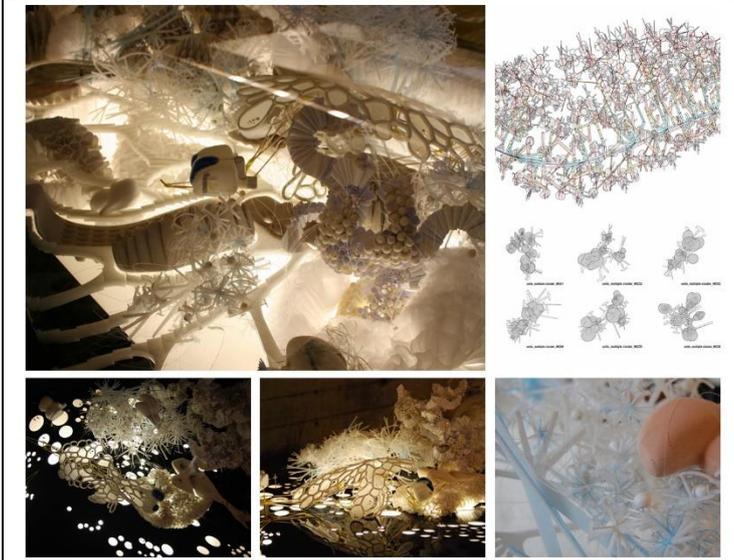
[http://reas.com/microimage\\_s2/](http://reas.com/microimage_s2/)

[CASM02]

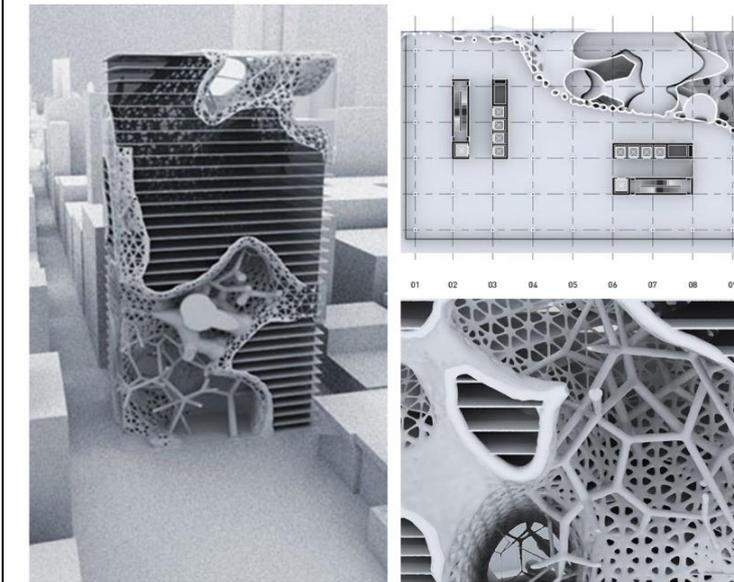
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : LT Collins ST Baths          Auteur : Kokkugia          Année : 2004          Source :  <a href="http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS">http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS</a>  <b>[KOKL04]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Jyväskylä Music and Arts Center          Auteur : Ocean          Année : 2004          Source :  <a href="http://www.ocean-designresearch.net/index.php/design-mainmenu-39/architecture-mainmenu-40/jyvylainmenu-68">http://www.ocean-designresearch.net/index.php/design-mainmenu-39/architecture-mainmenu-40/jyvylainmenu-68</a>  <b>[OCEJ04]</b></p>
 <p>Element 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>F1: Circle</li> <li>B1: Move in a straight line</li> <li>B2: Constrain to surface</li> <li>B3: Change direction while touching another Element</li> <li>B4: Move away from an overlapping Element</li> </ul> <p>Process 4</p> <p>A rectangular surface filled with varying sizes of Element 1. Draw a line from the centers of Elements that are touching. Set the value of the shortest possible line to black and the longest to white, with varying grays representing values in between.</p>	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Process 4          Auteur : Casey Reas          Année : 2005          Source :  <a href="http://reas.com/compendium_lecture/">http://reas.com/compendium_lecture/</a>  <b>[CASP05]</b></p>



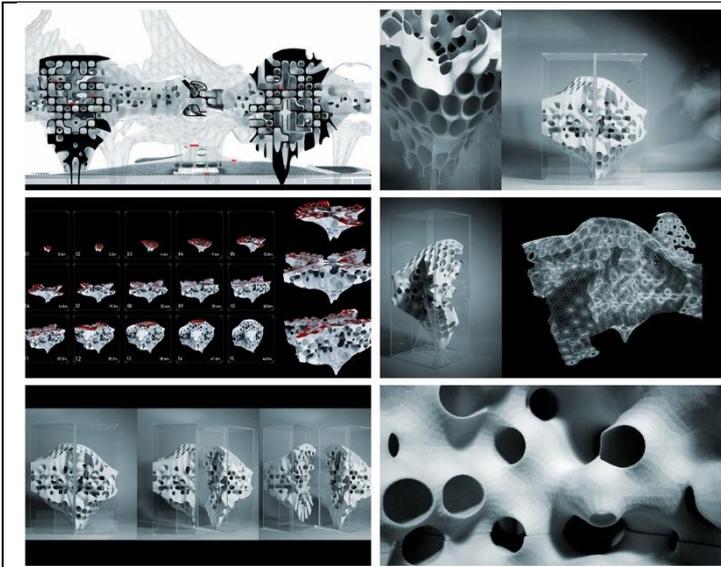
**Catégorie : Système multi-agents**  
 Projet : Orbita Series  
 Auteur : Biothing  
 Année : 2006  
 Source :  
<http://www.biothing.org/?p=34>  
**[BIOO06]**



**Catégorie : Système multi-agents**  
 Projet : Archigram  
 Auteur : Minimaforms  
 Année : 2008  
 Source :  
<http://minimaforms.com/archigram/>  
**[MINA08]**



**Catégorie : Système multi-agents**  
 Projet : Trabeculae  
 Auteur : Supermanoeuvre  
 Année : 2008  
 Source :  
<http://supermanoeuvre.com/trabeculae-tower/>  
**[SUPT08]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Living Morphologies

Auteur : Supermanoeuvre

Année : 2008

Source :

<http://supermanoeuvre.com/living-morphologies/>  
[SUPL08]



**Catégorie : Système multi-agents**

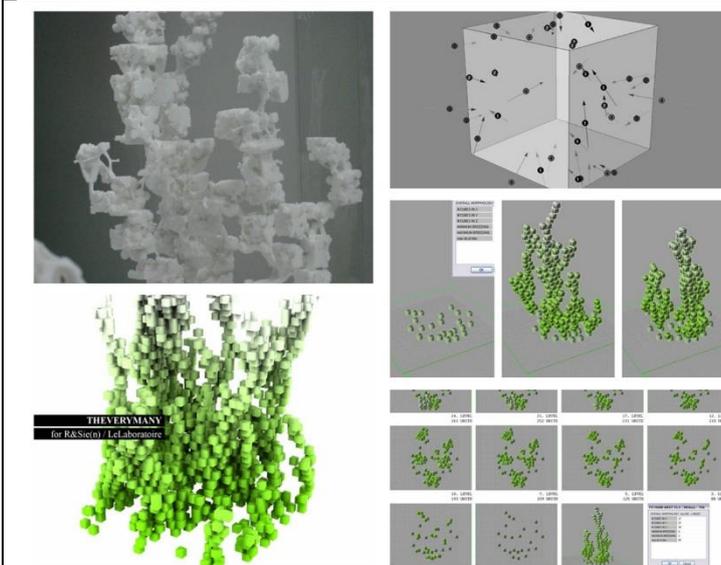
Projet : Transient States

Auteur : Sjet

Année : 2008

Source :

[http://www.sjet.us/PHILA\\_TRANSIENT\\_STATES.html](http://www.sjet.us/PHILA_TRANSIENT_STATES.html)  
[SJET08]



**Catégorie : Système multi-agents**

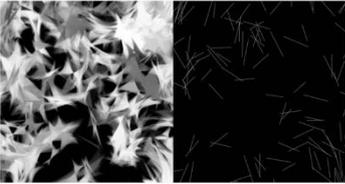
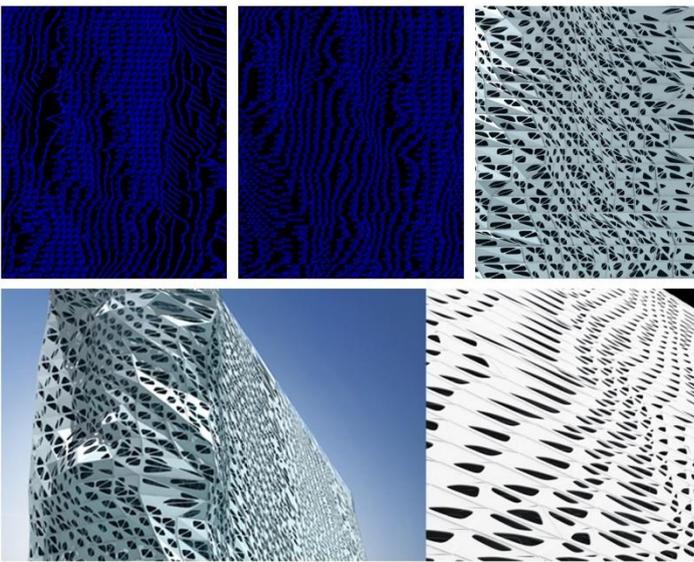
Projet : Growth & Morphologies

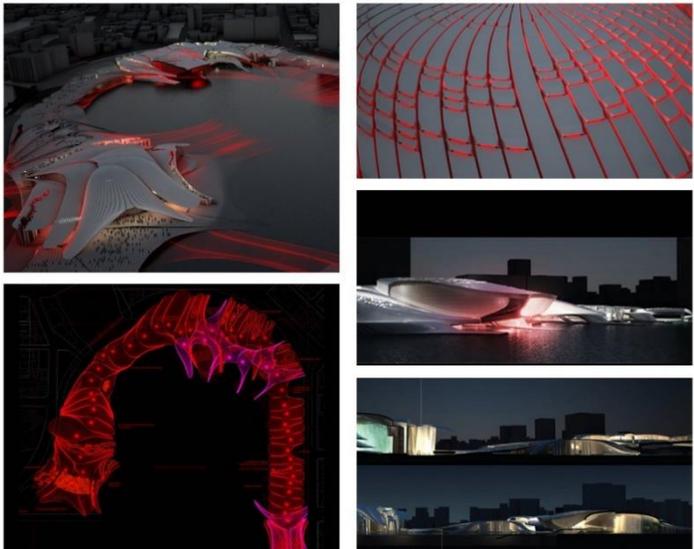
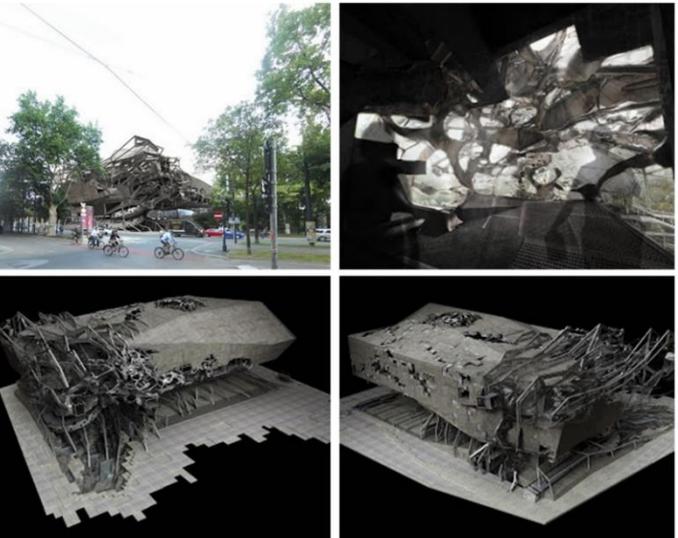
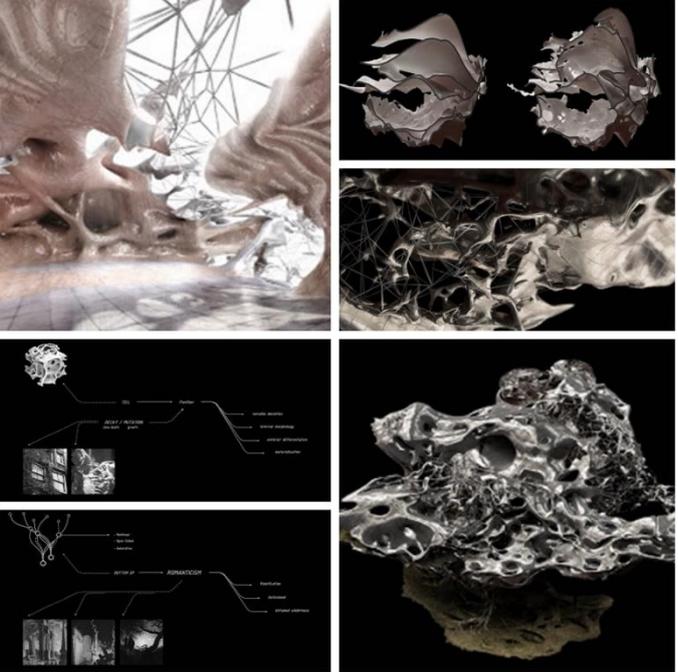
Auteur : THEVERYMANY

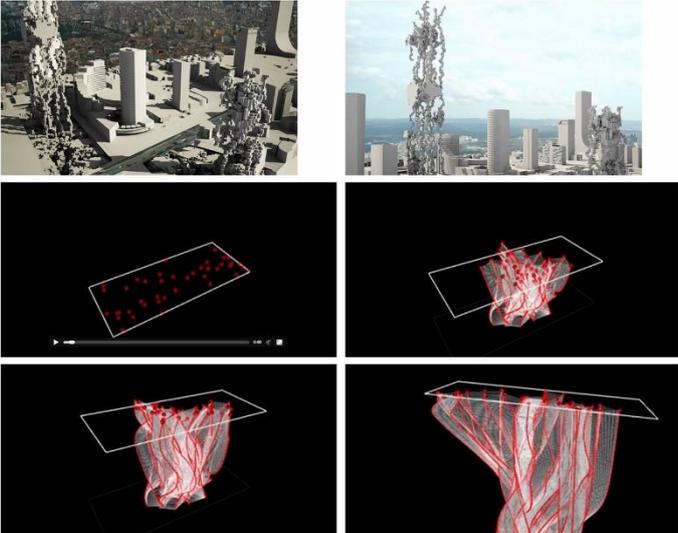
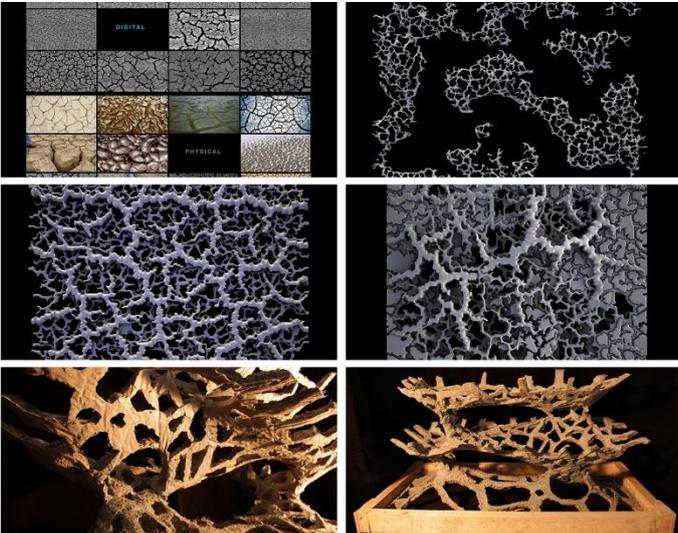
Année : 2009

Source :

<http://theverymany.com/with/10-growth/>  
[THEG09]

	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Mesonic Fabrics          Auteur : Biothing          Année : 2007-2009:          Source :  <a href="http://www.biothing.org/?p=51">http://www.biothing.org/?p=51</a>  <b>[BIOM09]</b></p>
<div data-bbox="156 770 501 954"> <p>Element 5</p> <pre>F2: Line B1: Move in a straight line B5: Enter from the opposite edge after moving off the surface B6: Orient toward the direction of an Element that is touching B7: Deviate from the current direction</pre> </div>  <div data-bbox="156 1151 501 1330"> <p>Process 18</p> <p>A rectangular surface filled with instances of Element 5, each with a different size and gray value. Draw a quadrilateral connecting the endpoints of each pair of Elements that are touching. Increase the opacity of the quadrilaterals while the Elements are touching and decrease while they are not.</p> </div> 	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Process 18          Auteur : Casey Reas          Année : 2010          Source :  <a href="http://reas.com/p18_s/">http://reas.com/p18_s/</a>  <b>[CASP10]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Ghatkopar India School Facade          Auteur : Biothing          Année : 2010          Source :  <a href="http://www.biothing.org/?cat=20">http://www.biothing.org/?cat=20</a>  <b>[BIOG10]</b></p>

	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : PHOSPHORESCENCE          Auteur : Biothing          Année : 2010          Source :  <a href="http://www.biothing.org/?cat=23">http://www.biothing.org/?cat=23</a>  <b>[BIOP10]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Excessive Studio II          Auteur : Eragatory          Année : 2011          Source :  <a href="http://eragatory.blogspot.fr/2011/07/excessive-studio-ii-final.html">http://eragatory.blogspot.fr/2011/07/excessive-studio-ii-final.html</a>  <b>[ERAE11]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Music Pavilion          Auteur : Eragatory          Année : 2011          Source :  <a href="http://eragatory.blogspot.fr/2011/01/secondary-presentation-finals-excessive.html">http://eragatory.blogspot.fr/2011/01/secondary-presentation-finals-excessive.html</a>  <b>[ERAM11]</b></p>

	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Crafted Tower          Auteur : Dağhan Çam          Année : 2011          Source :  <a href="http://daghancam.blogspot.fr/2011/05/craftedtower.html">http://daghancam.blogspot.fr/2011/05/craftedtower.html</a>  <b>[DAGC11]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Endemic Interstices Phase I          Auteur : Dağhan Çam          Année : 2011          Source :  <a href="http://daghancam.blogspot.fr/2011/06/endemic-interstices-phase-1.html">http://daghancam.blogspot.fr/2011/06/endemic-interstices-phase-1.html</a>  <b>[DAGE11]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Smudge          Auteur : Eragatory          Année : 2012          Source :  <a href="http://eragatory.blogspot.fr/2011/09/smudge.html">http://eragatory.blogspot.fr/2011/09/smudge.html</a>  <b>[ERAS12]</b></p>



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Tower Study No 7

Auteur : Daniel Widrig

Année : 2012

Source :

<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Tower Study NO 7>

**[DANT12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Grid

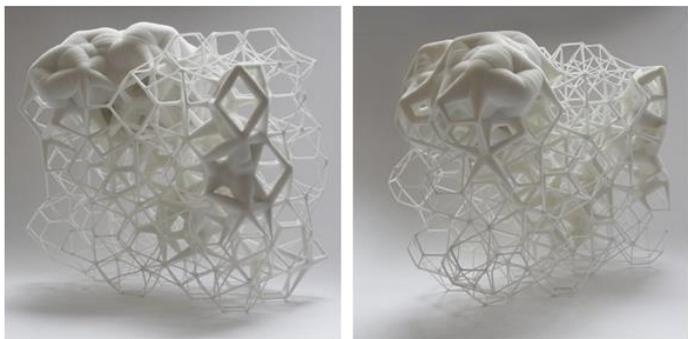
Auteur : Daniel Widrig

Année : 2012

Source :

<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Grid>

**[DANG12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Double Agent White

Auteur : THEVERYMANY

Année : 2012

Source :

<http://theverymany.com/constructs/12-atelier-calder/>

**[THED12]**





**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Biomolecular Self-Assembly

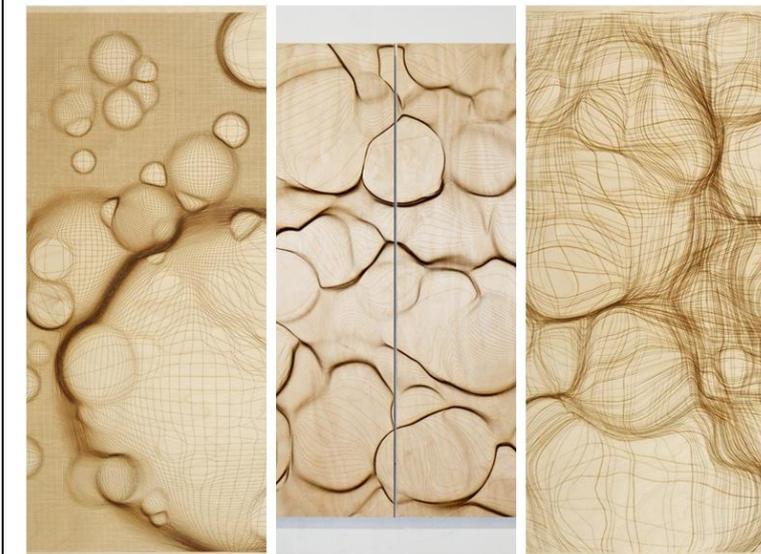
Auteur : Sjet

Année : 2012

Source :

[http://www.sjet.us/TED\\_GLOBAL2012.html](http://www.sjet.us/TED_GLOBAL2012.html)

**[SJEB12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Grid Distorsion

Auteur : Marius Watz

Année : 2008-2012

Source :

<http://www.unlekker.net/proj/griddistorsions/>

**[MARG12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Bloom

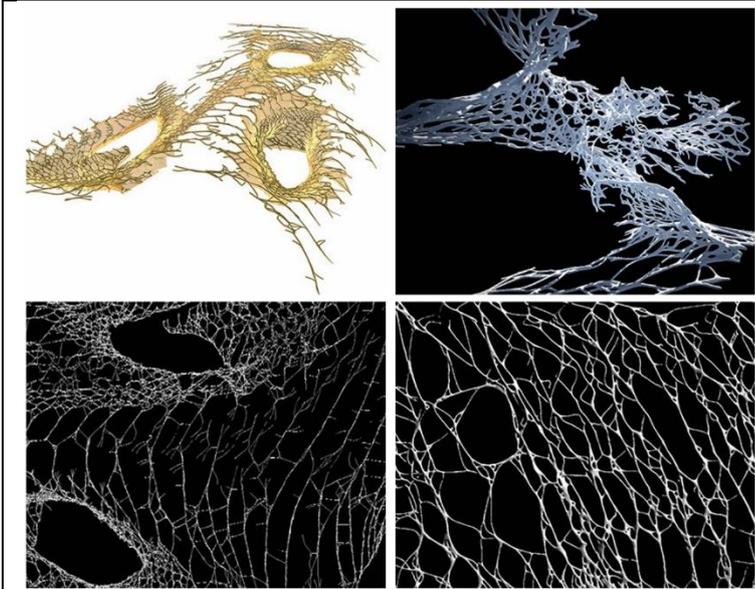
Auteur : Biothing

Année : 2012

Source :

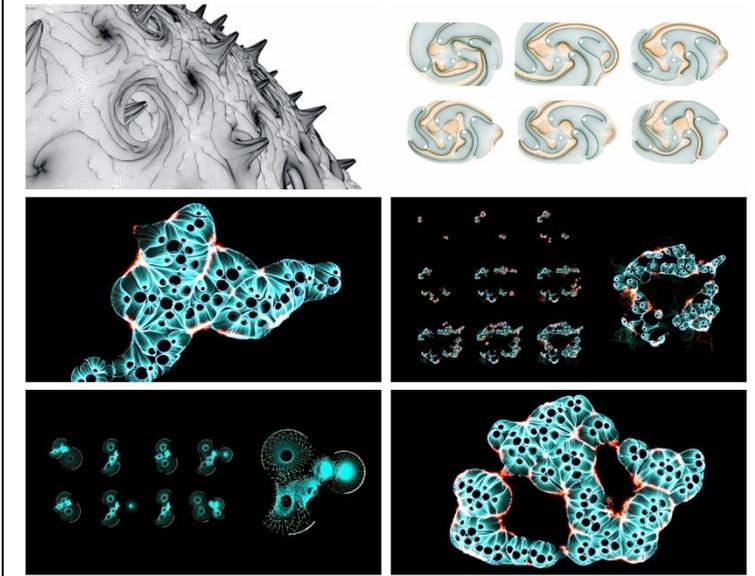
<http://www.bloom-thegame.com/main/>

**[BIOB12]**



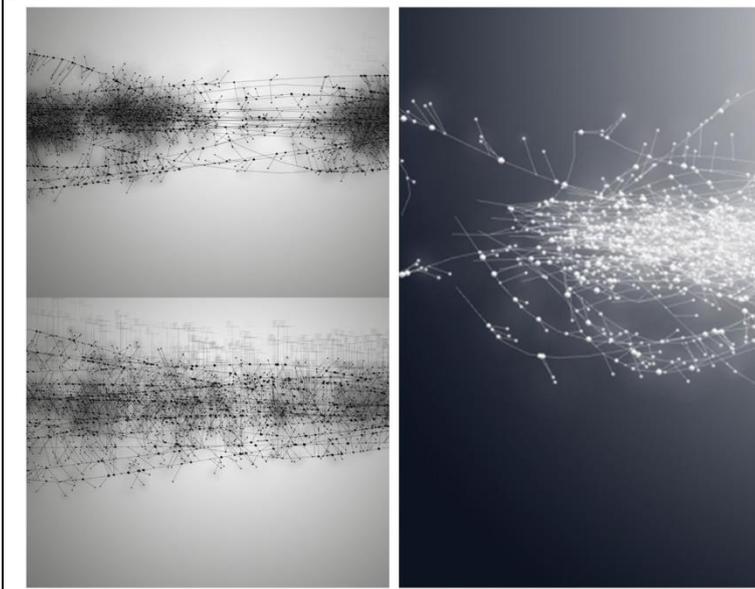
**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Speculative Research  
 Auteur : Kokkugia  
 Année : 2010-2012  
 Source :  
<http://www.kokkugia.com/stigmeric-landscape>  
**[KOKS12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Soft Cast  
 Auteur : Minimaforms  
 Année : 2012  
 Source :  
<http://minimaforms.com/soft-cast-2/>  
**[MINS12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Moth  
 Auteur : Jose Sanchez  
 Année : 2012  
 Source :  
<http://plethora-project.com/completeworks/2012/04/27/moth/>  
**[JOSM12]**



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Karosta [KUBE] The homemade dessert & Liepaja city council competition

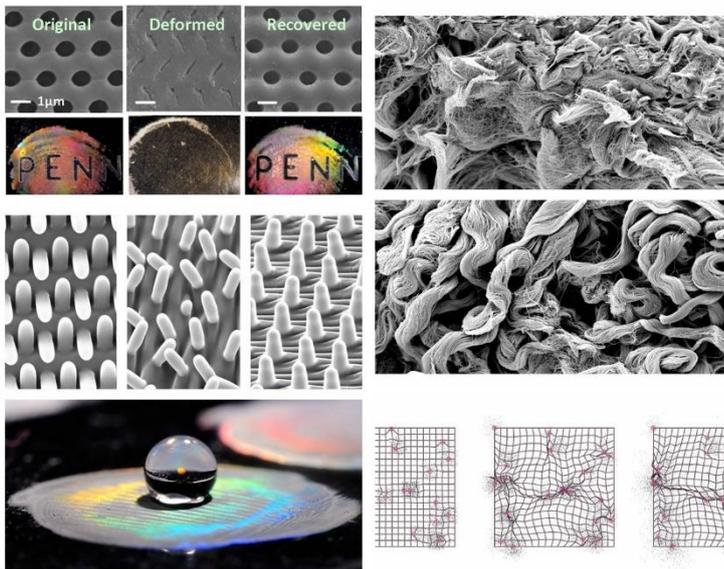
Auteur : Isaie Bloch + Gilles Restin

Année : 2013

Source :

[http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal\\_17.html](http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal_17.html)

[ISAK13]



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : eSKIN

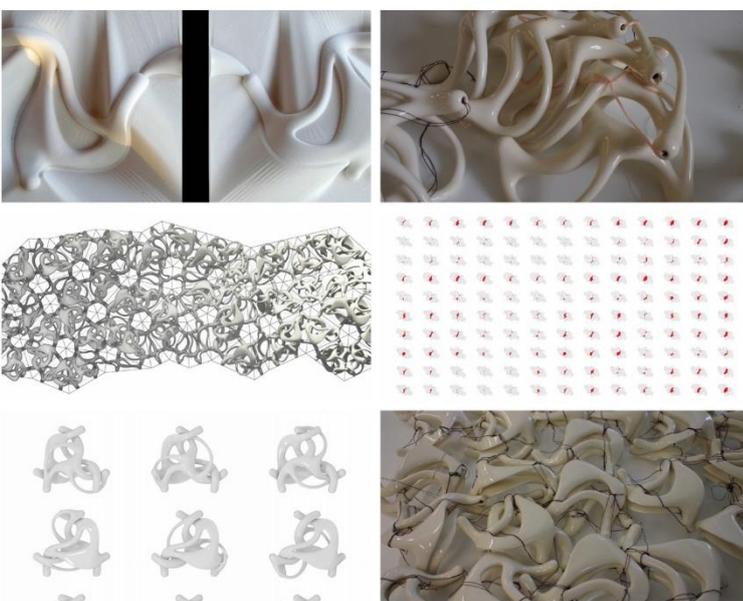
Auteur : Jenny Sabin

Année : 2007-2013

Source :

<http://jennysabin.com/?p=953>

[JENE13]



**Catégorie : Système multi-agents**

Projet : Polymorph Digital Ceramics

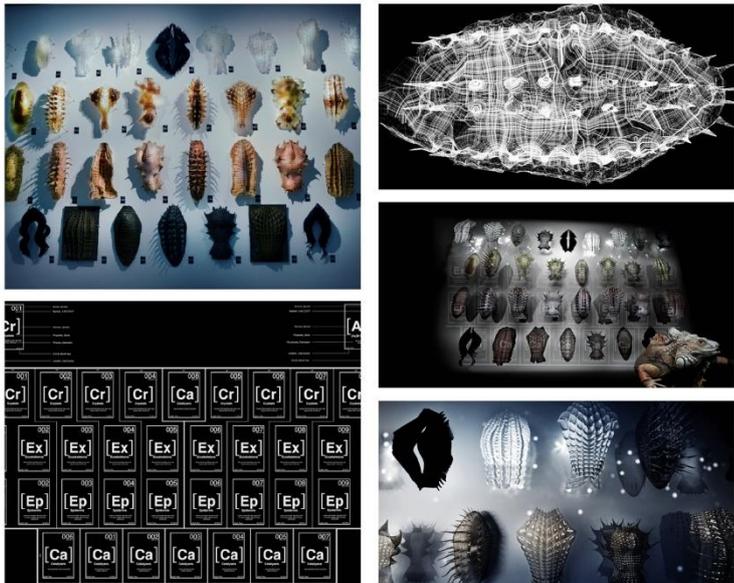
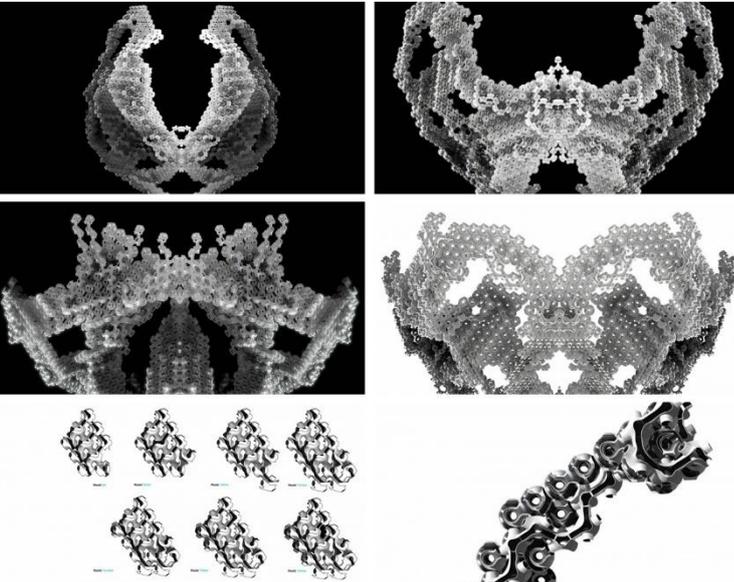
Auteur : Jenny Sabin

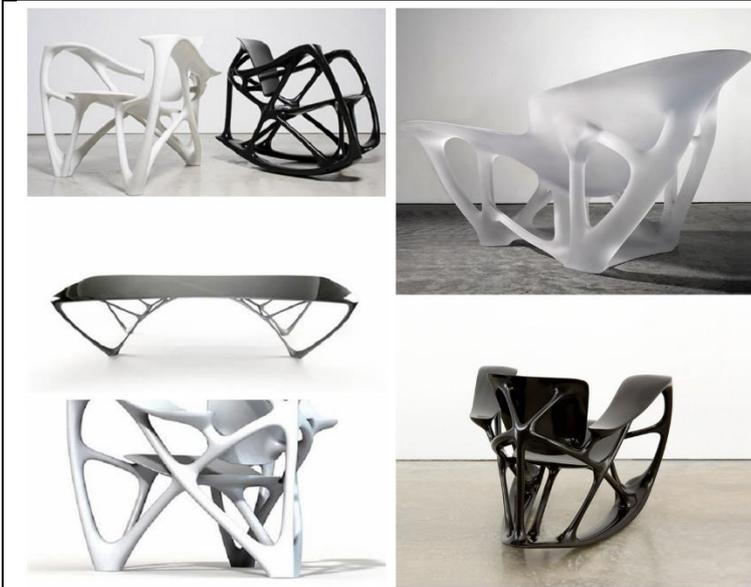
Année : 2009-2013

Source :

<http://jennysabin.com/?p=909>

[JENP13]

	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Cabinet of postdigital curiosities          Auteur : [Ay] Architecture          Année : 2009          Source : <a href="http://www.ayarchitecture.com/cabinet-of-postdigital-curiosities">http://www.ayarchitecture.com/cabinet-of-postdigital-curiosities</a>  <b>[AYAC09]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Système multi-agents</b>          Projet : Polyomino          Auteur : Jose Sanchez          Année : 2014          Source : <a href="http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/23/polyomino-exhibition/">http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/23/polyomino-exhibition/</a>  <b>[JOSP14]</b></p>
	<p><b>Catégorie : Algorithme évolutionniste</b>          Projet : Chair Model T1-M          Auteur : EZCT          Année : 2004          Source : <a href="http://www.ezct.net/">http://www.ezct.net/</a>  <b>[EZCC04]</b></p>



**Catégorie : Algorithme évolutionniste**

Projet : Bone Furniture

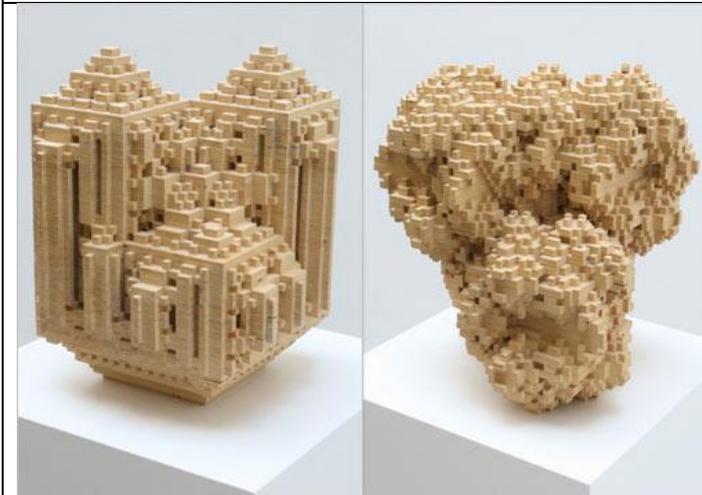
Auteur : Joris Laarman Lab

Année : 2006

Source :

<http://www.jorislaarman.com/bone-furniture.html>

[JORB06]



**Catégorie : Automate évolutionniste**

Projet : Breed

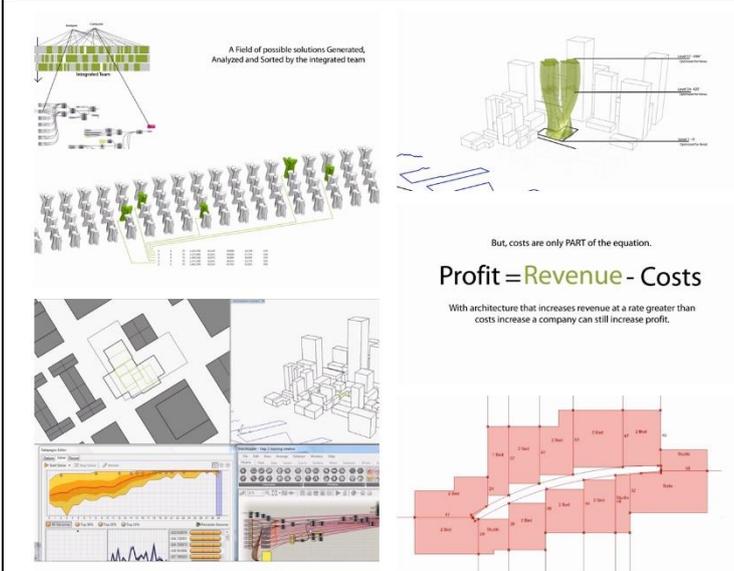
Auteur : Driessens & Verstappen

Année : 2010

Source :

<http://notnot.home.xs4all.nl/breed/Breed.html>

[DRIB10]



**Catégorie : Algorithme évolutionniste**

Projet : n/a

Auteur : Nate Holland

Année : 2011

Source :

<https://vimeo.com/22253596>

[NATN11]



**Catégorie : Automate cellulaire**

Projet : Australian Wildlife Health Centre

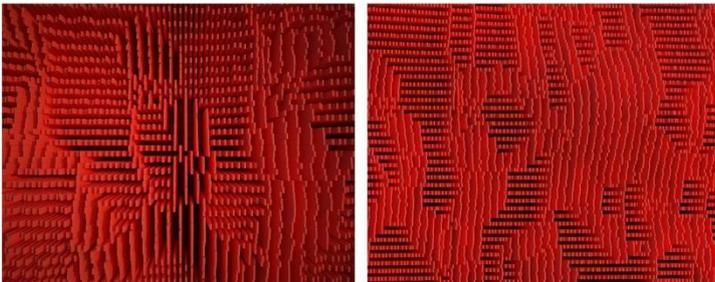
Auteur : Minifie Nixon

Année : 2006

Source :

[http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian\\_wildlife\\_centre](http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian_wildlife_centre)

[MINA06]



**Catégorie : Automate cellulaire**

Projet : CA04

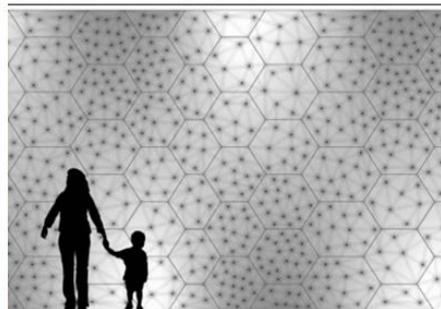
Auteur : Biothing

Année : 2008

Source :

<http://www.biothing.org/?cat=16>

[BIOC08]



**Catégorie : Automate cellulaire**

Projet : P\_Wall

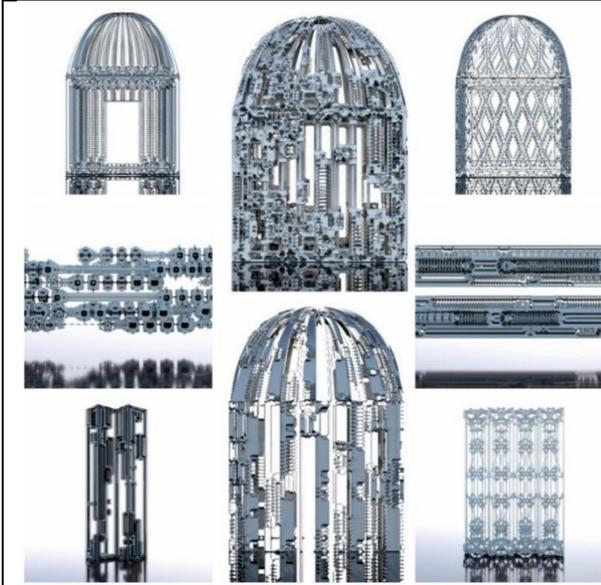
Auteur : Matsys

Année : 2009

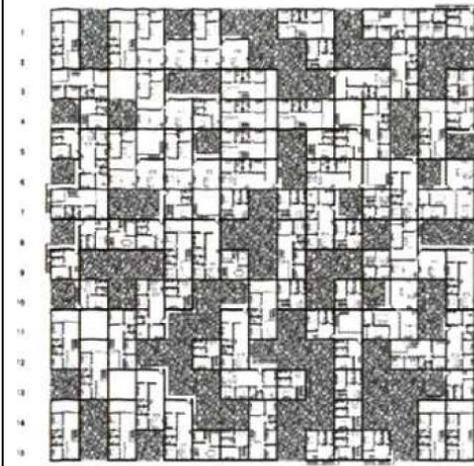
Source :

[http://matsysdesign.com/2009/08/11/p\\_wall2009/](http://matsysdesign.com/2009/08/11/p_wall2009/)

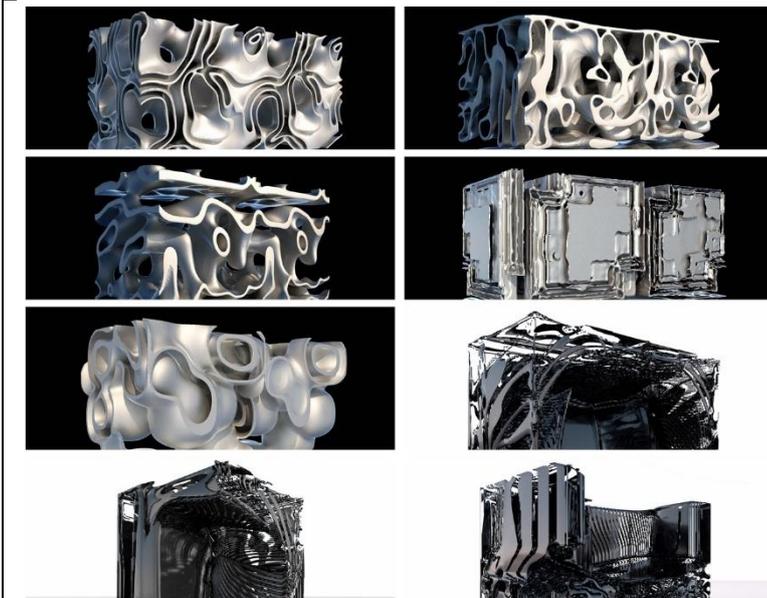
[MATP09]



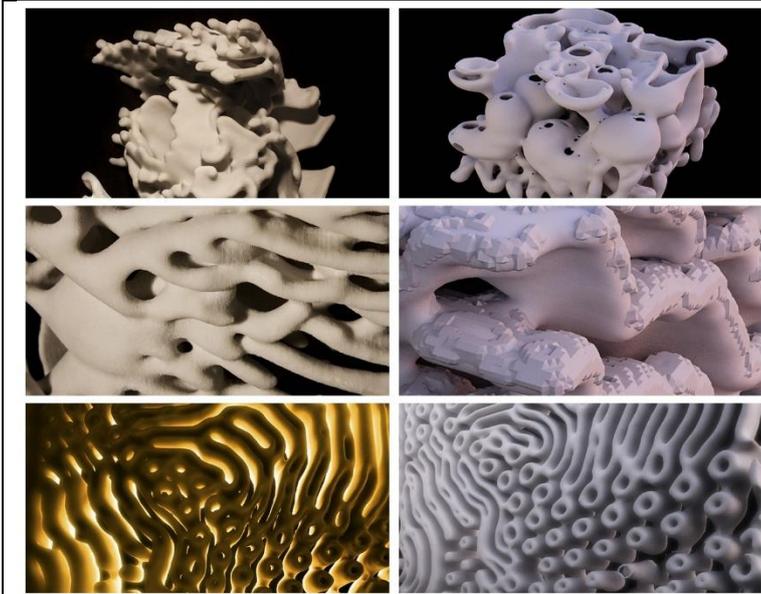
**Catégorie : Automate cellulaire**  
 Projet : Voxel-based Geometries  
 Auteur : Michael Hansmeyer  
 Année : 2009  
 Source :  
[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels\\_info3.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info3.html)  
**[MICV09]**



**Catégorie : Automate cellulaire**  
 Projet : Cube 1001  
 Auteur : Biao Li  
 Année : 2007  
 Source :  
 LI Biao, Architectural Generative Design: Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design, Nanjing, Southeast University Press, 2012, p.115  
**[BIAC07]**



**Catégorie : Réaction-diffusion**  
 Projet : Voxel-based Geometries  
 Auteur : Michael Hansmeyer  
 Année : 2009  
 Source :  
<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels.html?screenSize=1&color=1>  
**[MICV09]**



**Catégorie : Réaction-diffusion**

Projet : reTUR(n) INGmatter

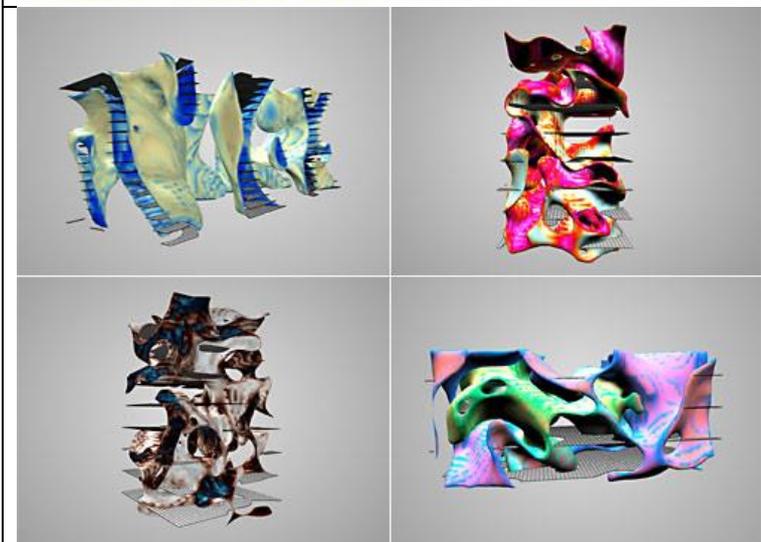
Auteur : Dağhan Çam

Année : 2010

Source :

URL:<http://daghancam.blogspot.fr/2010/12/returningmatter.html>

[DAGR10]



**Catégorie : Réaction-diffusion**

Projet : Saturation

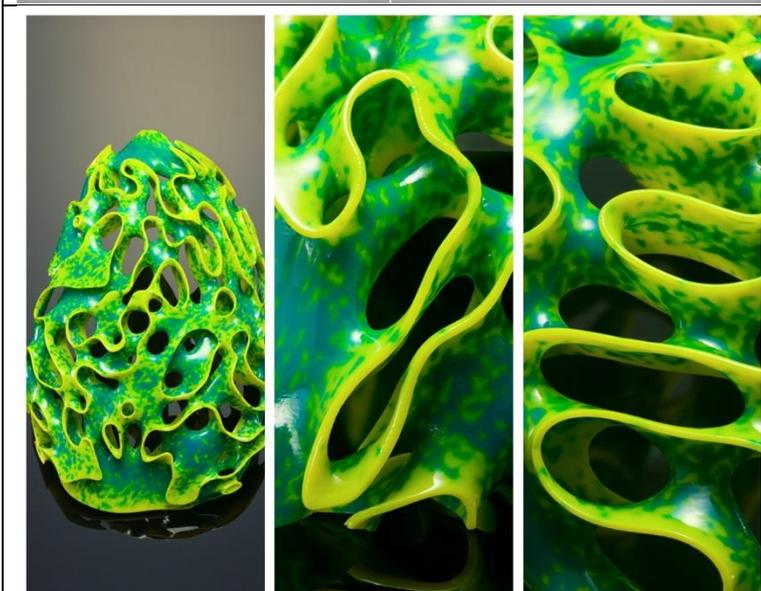
Auteur : Dominik Strzelec

Année : 2012

Source :

<http://www.triangulation.jp/2012/02/speculative-apps-by-dominik-strzelec.html>

[DOMS12]



**Catégorie : Réaction-diffusion**

Projet : Pneuma 2

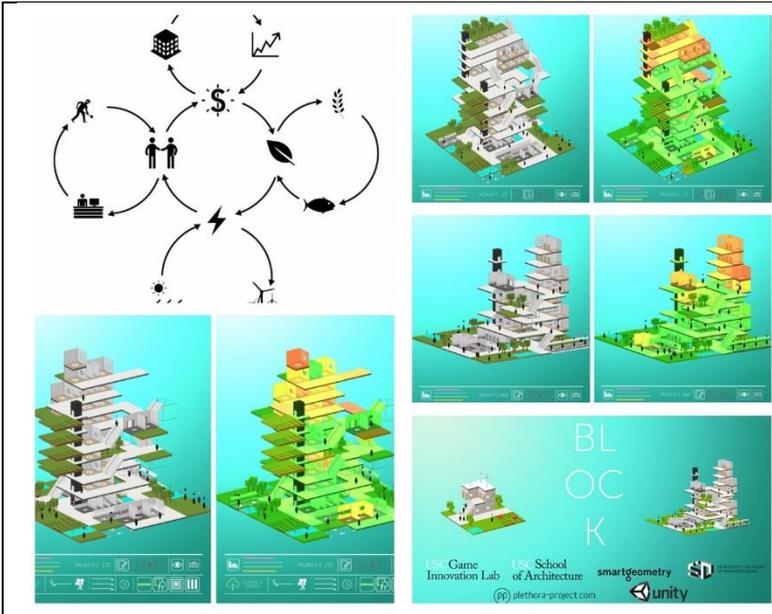
Auteur : Neri Oxman

Année : 2012

Source :

<http://www.materialecology.com/projects/details/pneuma-2>

[NERP12]



**Catégorie : Intelligence collective**

Projet : Block

Auteur : Jose Sanchez

Année : 2014

Source :

<http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/22/block-video-game/>  
**[JOSB14]**

### **3. Analyse**

#### **3.1 Similarités et différences au sein des catégories proposées**

Les projets empruntant les méthodes de modélisation des algorithmes non-linéaires sont rangés dans six classes, celle des « fractales, de la réaction-diffusion, des automates cellulaires, de l'algorithme évolutionniste, des systèmes multi-agents et enfin de l'intelligence collective. Cependant à l'analyse, nombre de ces projets débordent du cadre de cette classification.

Ainsi la plupart des projets regroupés dans la famille « réaction-diffusion » ou « automate cellulaire » peuvent tout autant être réalisés à l'aide d'un système multi-agents. Par contre, ces deux catégories ont depuis longtemps été développées indépendamment et chacune dispose de propriétés bien à elle, c'est pour cette raison que l'on a continué à les considérer comme des catégories autonomes.

### 3.1.1 Fractales

#### A. Introduction

« ...L'expérience de l'humanité nous présente depuis toujours certaines formes qui ont cette propriété particulière, que chaque partie est comme le tout, mais en plus petit. Qu'est-ce que l'humanité a fait avec ça ? Très peu. »<sup>55</sup> Fractale est une courbe ou surface de forme irrégulière ou morcelée qui se crée en suivant des règles déterministes ou stochastiques impliquant une homothétie interne. Le terme « fractale » est un néologisme créé par Benoît Mandelbrot en 1974 à partir de la racine latine *fractus*, qui signifie brisé, irrégulier. Dans la « théorie de la rugosité » développée par Mandelbrot, une fractale désigne des objets dont la structure est invariante même par changement d'échelle.<sup>56</sup>

Les fractales sont définies de manière paradoxale, en référence aux structures gigognes dont ils constituent des cas particuliers, elles sont plus exactement hologigognes, gigognes en tout point. Un objet fractal est un objet tautologique puisque chaque élément le composant est aussi un objet fractal. Exemples : « un ancêtre est un parent ou un ancêtre d'un parent, un multiple est un composé d'un nombre ou d'un multiple de ce nombre, un escalier commence ou prolonge un escalier, une dynastie inaugure ou prolonge une dynastie, etc. »<sup>57</sup>.

Un objet fractal possède au moins l'une des 5 caractéristiques suivantes<sup>58</sup> :

55. Benoît Mandelbrot, « Les fractales et l'art de la rugosité », TED Talk, septembre 2013. Traduction personnelle

56. ...je dus me résoudre pendant l'hiver 1975 à forger un nouvel adjectif : ce fut fractal. Un ami (nullement suspect de contamination par la langue anglaise !) recommanda le pluriel masculin fractals, déclenchant la contre-offensive des partisans de fractaux. A titre de compromis, je décidai que le substantif se devait d'être féminin, à savoir, une fractale. (N'ayant que des fils, je souris qu'on me présente comme le « père des fractales ».)

Benoit Mandelbrot, « Les fractales, les monstres et la beauté », le débat, no 24, mars 1983, p. 65-66 et

La notion qui lui sert de fil conducteur sera désignée par l'un de deux néologismes synonymes, « objet fractal » et « fractale », termes que je viens de former, pour les besoins de ce livre, à partir de l'adjectif latin *fractus*, qui signifie « irrégulier ou brisé »

Benoit Mandelbrot, « LES OBJETS FRACTALS Forme, hasard et dimension », Flammarion, 1995, p.5, [1<sup>ère</sup> ed. Flammarion, 1975]

57. Faber Sperber, Robert Paris, « Univers fractal », Matière et Révolution, dimanche 18 octobre 2009, URL :

<http://www.matierevolution.fr/spip.php?article1444>

- une structure complexe composée de détails similaires quelque que soit leur échelle,
- une irrégularité difficile à décrire dans le langage géométrique classique tant localement que globalement,
- une certaine forme d'auto-similarité approximative ou statistique,
- une dimension d'Hausdorff <sup>59</sup> supérieure à sa dimension topologique, <sup>60</sup>
- une possibilité d'être dans la plupart des cas décrit de manière récursive.

Les figures fractales n'ont pas à satisfaire toutes les propriétés mentionnées ci-dessus pour servir de modèle. Il leur suffit de réaliser des approximations convenables de ce qui intéresse dans un domaine de validité donné. Et c'est pour cela que parmi les 18 projets sélectionnés, certains pourraient être placés dans d'autres familles. Ils sont classés ici c'est parce qu'ils présentent des caractéristiques fractales intéressantes.

Les figures fractales peuvent être des fractales déterministes ou stochastiques. Elles apparaissent souvent dans l'étude des systèmes chaotiques aussi.

58. Kenneth Falconer, « *Fractal Geometry* », John Wiley & Sons, 1989, p. xx

59. La dimension de Hausdorff ou la dimension fractale a été introduite en 1918 par le mathématicien Felix Hausdorff, qui donne une indication de la façon dont une fractale particulière peut remplir l'espace pendant que le microscope zoome à des échelles de plus en plus fines.

Jane et Mark Burry, « *Mathématiques et architecture* », Actes Sud, 2010, p.257

60. un réseau d'irrigation est un déploiement de lignes (« en 1D ») qui offre des caractéristiques commençant à évoquer une surface (« en 2D »). La surface du poumon (« en 2D ») est repliée en une sorte de volume (« en 3D »).

## B. Catégories et projets

Les figures fractales peuvent être réparties en trois grandes catégories :

- les systèmes de fonctions itérées. Ceux-ci ont une règle de remplacement géométrique fixe (l'ensemble de Cantor, le tapis de Sierpinski, le triangle de Sierpinski, la courbe de Peano, le flocon de Koch) ;
- les fractales définies par une relation de récurrence en chaque point dans un espace (tel que le plan complexe) ou L-système. Exemples : les ensembles de Mandelbrot, la fractale de Lyapunov ;
- les fractals aléatoires, générés par des processus stochastiques et non déterministes, tels que les paysages fractals.

### 1) Les systèmes de fonctions itérées.

La théorie des systèmes de fonctions itérées ou IFS (Iterated Function System en anglais) a été développée par le mathématicien John Hutchinson en 1981. La notion centrale qui sous-tend cette théorie est l'invariance structurelle lors des changements d'échelle.

#### **Le triangle de Sierpinski**

Le triangle de Sierpinski (Fig. 3.1), aussi appelé par Mandelbrot « joint de culasse de Sierpinski », est une fractale, du nom de Waclaw Sierpinski.

Soit un triangle « plein » initial qui va subir une infinité d'itérations consistant à diviser par deux la taille du triangle puis à en juxtaposer trois exemplaires par leurs sommets pour former un nouveau triangle. A chaque itération le

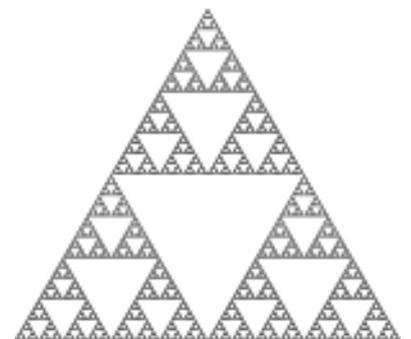


Figure 3.1 Le triangle de Sierpinski

triangle est donc de même taille, mais « de moins en moins plein ».

L'algorithme correspondant au triangle de Sierpinski peut s'écrire de la manière suivante (Fig. 3.2) :

- Considérer un triangle quelconque du plan.
- Tracer ensuite les trois segments qui joignent deux à deux les milieux des côtés du triangle afin de déterminer 4 nouveaux triangles.
- Soustraire le petit triangle central de sorte à faire apparaître trois petits triangles.
- Recommencer à la deuxième étape avec chacun des petits triangles obtenus.<sup>61</sup>

61. Benoît Mandelbrot, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, W.H. Freeman & Co Ltd, 1982, p.142



Figure 3.2 Quelques itérations pour obtenir un triangle de Sierpinski



Figure.3.3 Heneghan Peng Architects, Le projet du Grand Musée égyptien, 2003

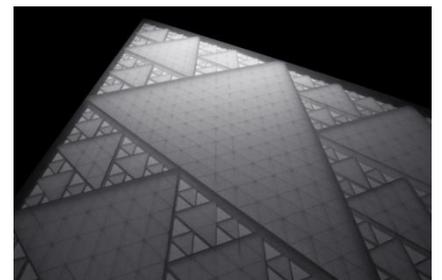


Figure. 3.4 Heneghan Peng Architects, Détail sur un triangle de Sierpinski, 2003

Le projet du Grand Musée égyptien (Fig. 3.3), commandé par le ministère égyptien de la Culture, a fait l'objet, en 2003, d'un concours international supervisé par l'UIA et parrainé par l'Unesco. Il a été remporté par l'agence d'architecture Heneghan Peng. Le programme concernait la création d'une halle d'exposition à grande échelle consacrée aux 7000 dernières années de l'histoire de l'Égypte et pouvant abriter plus de 100 000 objets, tout en étant visible des pyramides de Gizeh. La façade de projet est le mur de pierre translucide, de 750 mètres de longueur, qui est le principal événement tectonique et iconique. Les triangles de Sierpinski ont été adoptés en itération=5 pour constituer cette façade. La collaboration avec l'agence d'ingénierie Arup AGU, fait que ces triangles sont à la fois décoratifs et structurels (Fig. 3.4).

### **Courbe et flocon de Koch**

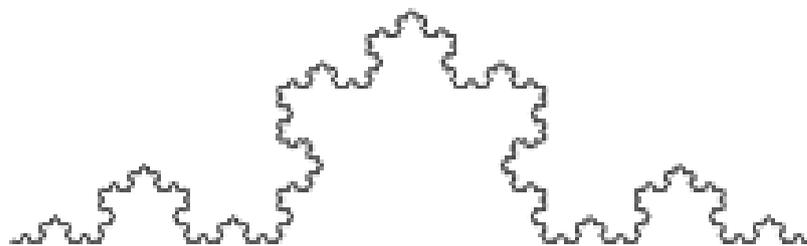


Figure. 3.5 Courbe de Koch

Le flocon de Koch<sup>62</sup> (Fig. 5), inventé en 1904 par le mathématicien suédois Helge von Koch, antérieur aux définitions de Mandelbrot, peut être pourtant considéré comme un des premiers objets fractals décrits.

Il s'agit en fait d'une courbe construite à partir d'un segment de droite divisé en trois segments identiques. Un triangle équilatéral est ensuite construit sur le segment médian pour enfin disparaître. Au terme de ces trois étapes se dessine

62. Benoît Mandelbrot, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, W.H. Freeman & Co Ltd, 1982, p.44

comme un chapeau de sorcière. Cette opération effectuée récursivement donne la courbe de Koch.

A\_maze (Fig. 3.6) est un système de meuble (série de tables)

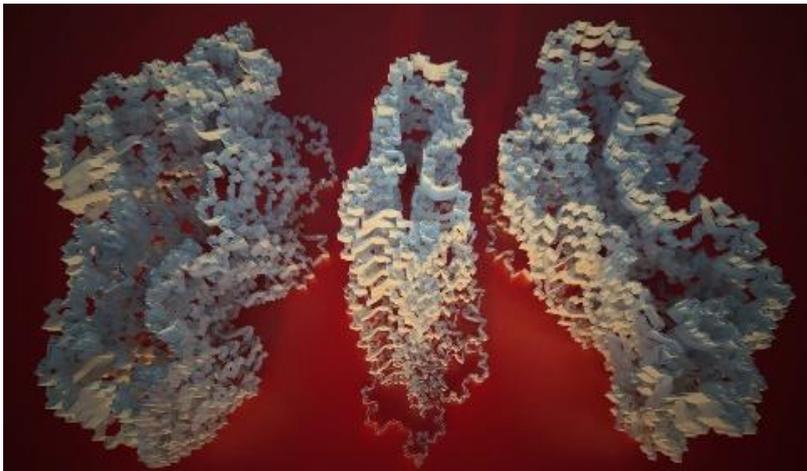


Figure 3.6 Biothing, A\_maze, 2010

qui a été initié pour l'exposition de Biothing dans le FRAC d'Orléans en 2010, Alisa Andrasek a créé d'abord une série de courbes de Koch. Elles sont extrudées en verticale et superposées selon un ordre ascendant de complexité.

Le flocon de Koch.<sup>63</sup> (Fig. 3.7) s'obtient de la même façon que la courbe Koch mais le processus de génération ne procède plus à partir d'un segment de droite mais d'un triangle équilatéral dont les modifications sont orientées vers l'extérieur.

A chaque étape le périmètre du triangle augmente de  $4/3$ .

Ce principe a engendré plusieurs variantes (Fig. 3.8) selon que l'on considère les angles droits – quadratique-, d'autre angles -fractale de Cesàro- ou des extensions dans les dimensions supérieures -sphereflake, surface de Koch-.

63. MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, W.H. Freeman & Co Ltd, 1982, p.42

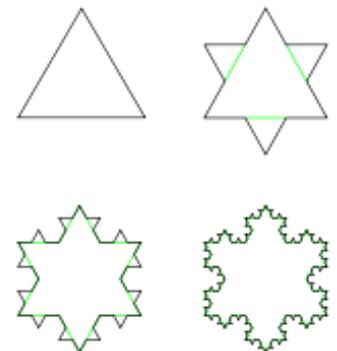


Figure 3.7 Quelques étapes pour obtenir le flocon de Koch

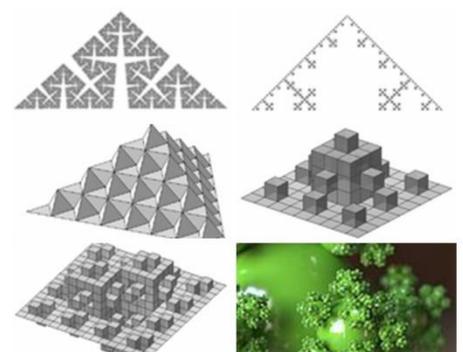


Figure 3. 8 Variantes du flocon de Koch

Situé face à l'entrée du Musée d'Art Contemporain de Tokyo, le Pavillon Bloomberg (Fig. 3.9) a été réalisé en partenariat avec le bureau d'ingénierie Oak Structural Design. Selon Hirata, pour concevoir cette galerie d'art de 23,4m<sup>2</sup> et 9 mètres de hauteur, le pavillon oppose nettement deux structures : l'une centrale de plan triangulaire (espace d'exposition), l'autre périphérique déployant librement dans

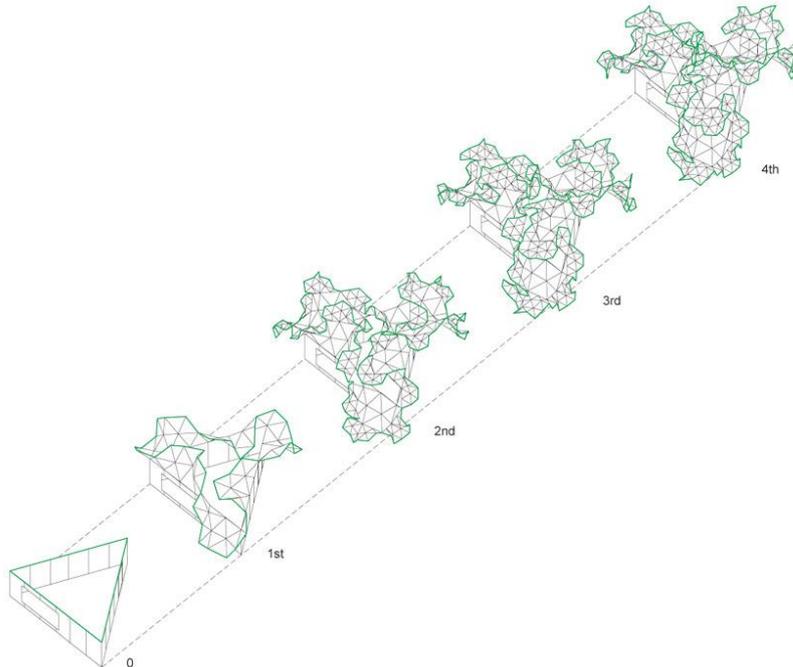


Figure 3.10 Akihisa Hirata, les différentes itérations du projet, 2011

l'espace une couverture ondoyante en acier plié obtenue par combinaison de deux types de triangles, isocèle et équilatéral. Si on regarde le schéma de ce projet (Fig. 3.10), on peut comprendre que Hirata a utilisé une variante de flocon de Koch pour ramener la complexité dans son projet, les 5 contours verts dans le schéma représentent les différentes itérations de son algorithme, de simple à de plus en plus fractale et complexe, ces contours sont reliés par des facettes triangulaires pour obtenir la forme finale. Le volume fractal de ce projet est assez simple, et doit son intérêt par le contraste avec le prisme triangulaire qui le supporte et qui en constitue la figure initiale.



Figure 3.9 Akihisa Hirata, Le Pavillon Bloomberg, 2011

## Courbe de Lévy

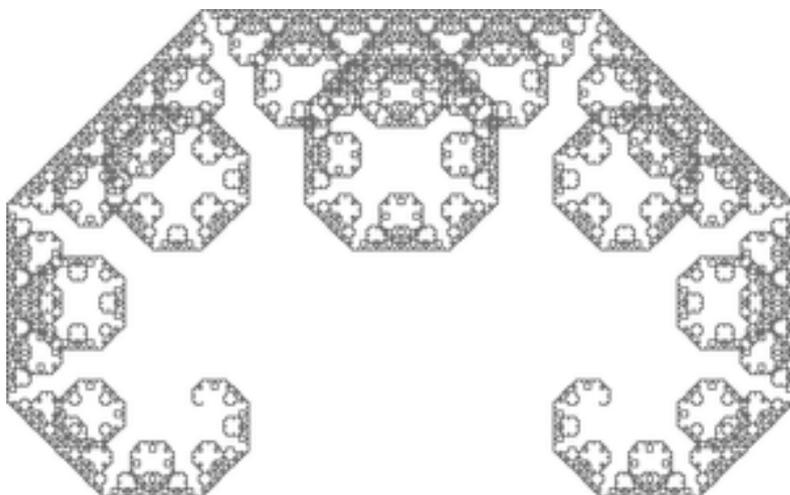


Figure 3.11 Courbe de Lévy

La courbe de Lévy ou courbe en C (Fig. 3.11) est une courbe fractale, appréhendée en 1906 par Ernesto Cesàro puis en 1910 Georg Farber, elle porte depuis le nom du mathématicien français Paul Lévy qui, en 1938, a été le premier à en décrire les propriétés d'auto-similarité, et à en apporter une construction géométrique.

La construction d'une courbe de Lévy par un IFS s'appuie sur un ensemble de deux fonctions linéaires. La première introduit une rotation de  $45^\circ$ , la deuxième une rotation de  $-45^\circ$  (Fig. 12). (Fig. 13) est la courbe de Lévy en version 3D.

Daniel Widrig fonde son studio à Londres en 2009, après plusieurs années de travail au sein de l'agence Zaha Hadid Architects. Dans le projet FractalForms (Fig. 3.14), 2012, Daniel Widrig a créé une forme de chou-fleur très semblable à la courbe de Lévy en 3D. Malheureusement, il s'est gardé de préciser l'algorithme employé pour générer cette forme. Par contre, ce qui est très intéressant dans ce projet est l'opposition entre la forme alvéolaire de la structure intérieure et la forme fractale extérieure. Cette structure

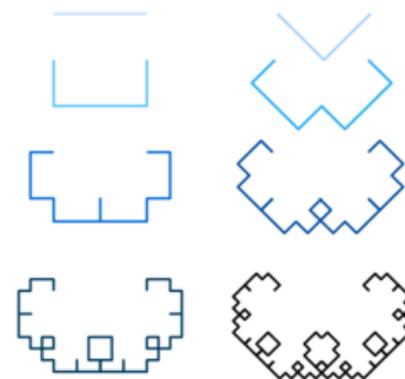


Figure 3.12 Quelques étapes pour obtenir une courbe de Lévy

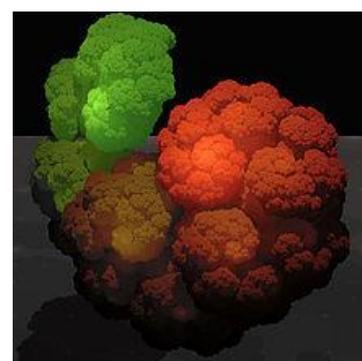


Figure 3.13 La courbe de Lévy en 3D



Figure. 3.14 Daniel Widrig, Les maquettes de FractalForms fabriqués par imprimante 3D, 2012

intérieure en nid d'abeille dont la raison est purement matérielle (économiser des matériaux), offre à l'objet créé une complexité supérieure au seul objet fractal.

### **Autres**

Le système de fonctions itérées est juste une méthode de génération des objets fractals. Les trois exemples sont les plus connus visualisés par les mathématiciens, ce qui a permis des emprunts directs en architecture—sans même en modifier la règle originale.

Mais il existe bien plus de géométries fractales qui peuvent être réalisées par IFS. Par exemple, l'ensemble de Cantor, La fougère de Barnsley, la courbe de Peano, etc. Les projets Federation Square, 2003, de Lab Architecture Studio et Le Louvre d'Abu Dhabi, 2010, d'ateliers Jean Nouvel sont réalisés à partir de ce système.

Le principal caractère de cette sous-catégorie est la contraction. C'est-à-dire que les objets fractals créés par IFS peuvent avoir une complexité infinie sans pour autant développer une expansion de surface (en 2D) ou de volume (en 3D).

Son deuxième caractère est l'autosimilarité exacte. Peu importe le nombre d'itérations effectuées, le tout est toujours semblable à une de ses parties.

2) Les fractales définies par une relation de récurrence en chaque point dans un espace

En mathématique, une suite récurrente est une suite définie par une relation itérative, où chaque terme se définit à partir du précédent.

Par exemple, la suite de Fibonacci est définie par une relation de récurrence.  $F_0=0$ ,  $F_1=1$ ,  $F_n=F_{n-1}+F_{n-2}$ .

Les deux figures fractales les plus connues de cette catégorie sont : les ensembles de Mandelbrot (Fig. 3.15) et la fractale de Lyapunov (Fig. 3.16).

### **Ensemble de Mandelbrot et Mandelbulb**

L'ensemble de Mandelbrot est une fractale définie comme l'ensemble des points  $c$  du plan complexe pour lequel la suite de nombres complexes est définie par récurrence. Et un Mandelbulb (Fig. 3.17) est un ensemble de Mandelbrot en 3 dimensions.

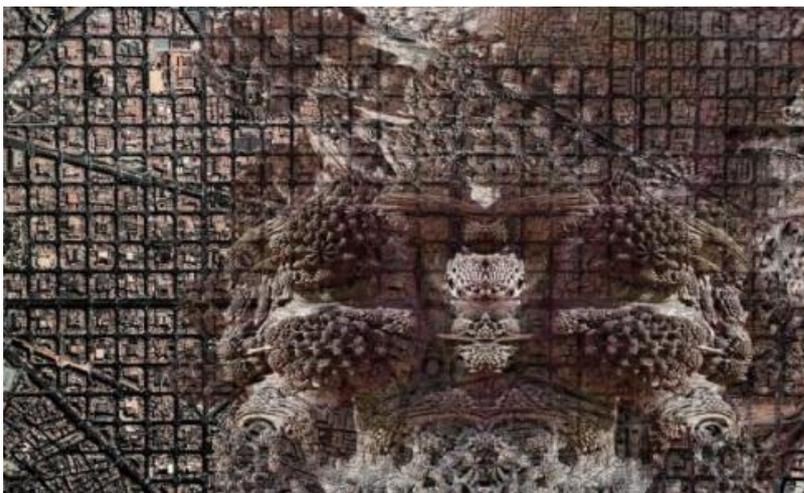


Figure 3.18 SPAN, Recursive Formation, 2010-2013

« Recursive Formation » (Fig. 3.18), 2010-2013, est une série de recherches prospectives qui comprend des maquettes, des animations et des structures architectoniques. Les

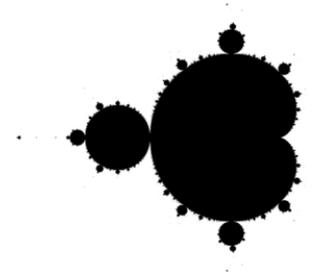


Figure 3.15 Les ensembles de Mandelbrot



Figure 3.16 La fractale de Lyapunov



Figure 3.17 Mandelbulb

auteurs de ce projet, Matias del Campo et Sandra Manninger ont utilisé la « géométrie récursive », commune à de nombreuses formes naturelles, comme méthode d'exploration de la densité des zones urbaines. Ils ne précisent cependant pas quelle « géométrie récursive », mais en le comparant avec le Mandelbulb, les deux objets présentent de nombreuses similarités.



Figure 3.19 Quelques détails sur un Mandelbulb en différentes échelles

Le recours au Mandelbulb et ses variantes pour appréhender les questions de densité urbaine à travers l'autosimilarité ramène à l'intuition fameuse d'Alberti pour laquelle la ville est une maison et réciproquement.

La plus grande différence entre ces types d'objets et les objets créés par IFS est le niveau d'auto similarité. Dans un objet créé par IFS (cf. la chapitre précédent), il y a toujours une auto similarité précise à toutes les échelles. Mais dans un objet créé par la relation de récurrence, l'auto similarité est assez faible, c'est-à-dire que si on zoome sur ces objets, on trouvera des détails ressemblants mais pas exactement

les mêmes. La Fig. 3.19 montre de tels détails sur un Mandelbulb à différentes échelles.

### **Géométries récursives basées sur des objets existants**

Les fractales ne sont pas seulement créées ex nihilo, elles peuvent tout autant être générées à partir d'objets existants. En pliant par exemple les surfaces de ces objets (avec l'algorithme récursif), on peut augmenter leur niveau de complexité.

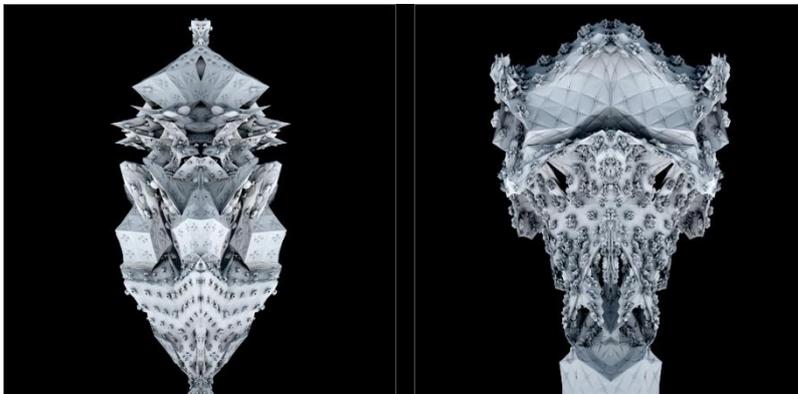


Figure 3.20 Michael Hansmeyer, *Platonic Solids*, 2010

Michael Hansmeyer procède de la sorte dans son projet expérimental, *Platonic Solids 2010* (Fig. 3.20, 3.21), pour obtenir un objet fractal d'une complexité incroyable à partir d'une sphère. Il recourt à l'algorithme de Catmull-Clark et l'algorithme de Doo-Sabain<sup>64</sup>. La figure 20 montre les quatre itérations de cet objet et sa complexité croissante. L'opération récursive appliquée sur la surface est la division, une surface divisée en plusieurs engendre plus de sommets, l'algorithme va les relier différemment, c'est grâce à ce processus récursif que cette complexité est obtenue.

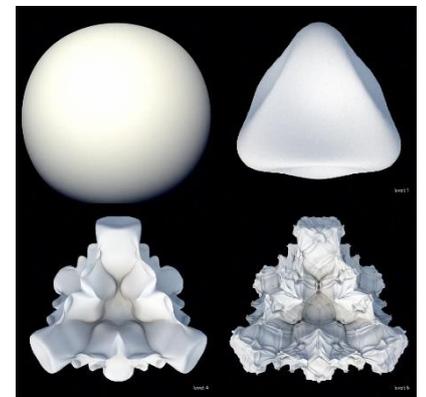


Figure 3.21 Michael Hansmeyer, *quelques itérations de Platonic Solids*, 2010

64. ils sont largement utilisés dans l'infographie qui sert à réaliser des sous divisions de surface et reconstruire des surfaces à partir des points.

Degenerate Chair (Fig. 3.22), 2012, de Daniel Widrig est un autre exemple de cette sous-catégorie. Il crée d'abord une forme de tabourets trois-pieds par voxel (Cf. projet Bone Furniture, dans l'algorithme évolutionniste), au lieu de sous diviser la surface de cet objet, il établit une règle de soustraction de matière (voxel).



Figure 3.22 Daniel Widrig, *Degenerate Chair*, 2012



Figure 3.23 Michael Hansmeyer, *Subdivided Columns*, 2010

Encore une fois, pour le projet *Subdivided Columns* (Fig. 3.23) de Michael Hansmeyer, il a appliqué sa technique sur un objet plus compliqué : une colonne dorique (abstraite), après plusieurs itérations de transformation, il a obtenu une forme beaucoup plus complexe que l'objet de départ.<sup>65</sup>

Si on compare ces trois exemples avec les objets fractals IFS, la différence est que dans cette sous-catégorie, l'auto similarité de ces objets est plus faible. Mais le point commun est la contraction, le volume final ne connaît pas d'expansion.

### 3) L-système

« Dans de nombreux processus de croissance des organismes vivants, en particulier chez les plantes, les apparitions

65. ...moule que j'allais un jour appeler fractal, et dont j'allais révéler qu'il peut aller jusqu'au plus riche baroque. Or, on sait très bien qu'à cette même époque les arts (architecture et peinture) étaient, eux, en train d'abandonner le baroque...

Benoit Mandelbrot, « Les fractales, les monstres et la beauté », *le débat*, no 24, mars 1983, p. 69

*régulières de certaines structures multicellulaires sont facilement perceptibles .... Dans le cas d'une feuille composée, par exemple, de lobes (ou) de limbes, ces derniers présentent, à un stade avancé, la même forme que la feuille entière à un stade précoce. Ainsi, l'auto-similarité dans les plantes est le résultat des processus de développement. En insistant sur la relation entre la croissance et la forme, ce livre suit une longue tradition en biologie. D'Arcy Thompson place son origine à la fin du XVIIe siècle, et la commente ainsi :*

*La forme organique en elle-même se trouve être, mathématiquement parlant, une fonction du temps .... Nous pourrions appeler la forme d'un organisme un événement dans l'espace-temps, et non pas seulement dans une configuration spatiale.*

*Ce concept est repris par Halle, Oldeman et Tomlinson:*

*L'idée de la forme contient implicitement aussi l'histoire d'une telle forme ».<sup>66</sup>*

En 1968, le biologiste hongrois Aristid Lindenmayer met au point une grammaire formelle afin de modéliser le processus de développement et de prolifération des plantes ou des bactéries.

Cette grammaire basée sur des processus génératifs est dite L-système du nom de son fondateur. Illustrée par de nombreux auteurs, elle offre des images spectaculaires. Przemyslaw Prusinkiewicz dans les années 1980 s'est employé à la systématiser.

Le concept central des L-system est la notion de réécriture. La réécriture est une technique pour construire des objets complexes en remplaçant à chaque étape les parties

66. PRUSINKIEWICZ P., Lindenmayer Aristid, *The Algorithmic Beauty of Plants*, New York, Springer, 1996, p.v

précédentes par de nouveaux éléments selon une règle précise.

Voici un exemple de la suite de Fibonacci

Alphabet :  $V = \{A, B\}$

Constantes :  $S = \{\}$

Axiome de départ :  $w = A$

Règles :  $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow AB)$

Voici le résultat sur six générations :

$n=0$ , A

$n=1$ , B

$n=2$ , AB

$n=3$ , B AB

$n=4$ , AB B AB

$n=5$ , B AB AB B AB

$n=6$ , AB B AB B AB AB B AB

Si on compte le nombre de symboles à chaque génération, on obtient la suite de Fibonacci.



Figure 3.24 Biothing, Arborics, 2009

Arborics, 2009 (Fig. 3.24) est un des premiers projets de Biothing (Alisa Andrasek). Ce projet a utilisé la notion de L-système en 2D. La règle de L-système introduite dans ce projet est très simple, voire un peu banale, en revanche, Alisa a joué avec tout ce qu'elle a comme outil. Par exemple, les longueurs d'extrusion de chaque cellule de 2D à 3D ont utilisé ses nombres de génération récursive, et la texture d'éclairage a utilisé la densité de cellule sur l'image en 2D (Fig. 3.25). Cette superposition de plusieurs techniques a

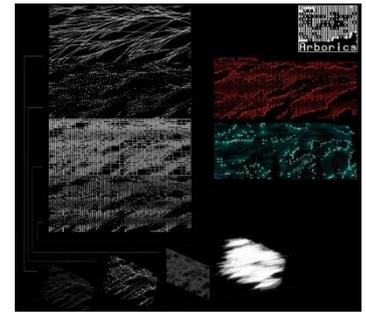


Figure 3.25 Des schémas montrent la transformation de motifs



Figure 3.26 Dağhan Çam, Fabware, 2010

créé une émergence de motifs très différenciés par rapport à la forme initiale. Par contre, dans les autres projets que cette architecte développe, uniquement conçus avec le L-système, cette qualité disparaît, sous la direction d'Alisa Andrasek, Dağhan Cam et ses collègues utilisent L-système comme une stratégie de remplissage d'espace dans son projet fabware (Fig. 3.26), 2010. Deux différents types de pièces (court, long) sont fabriqués et avec trois règles de combinaisons (court+court, court long, long + long) (Fig. 3.27), les pièces sont répétées et assemblées pour générer un maillage complexe.

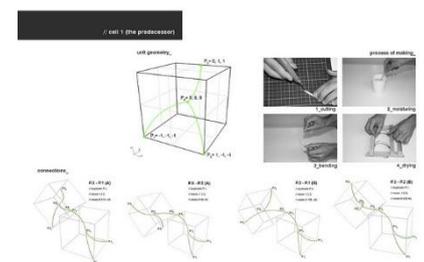


Figure 3.27 Dağhan Çam, Fabware, Règle de combinaison, 2010

Le résultat final est un peu décevant : la structure est certes compliquée, mais d'une complication dont on mesure mal sa pertinence dans un projet d'architecture.

Dans le projet SuperMatter, 2009 (Fig. 3.28), l'agence Supermanoeuvre a recours également au L-système basé sur 3 éléments de départ nommés « A, B et C ». Chaque élément présente déjà un assemblage : une surface horizontale et certaines ouvertures. La règle de combinaison s'avère aussi



Figure 3.28 Supermanoeuvre, SuperMatter, 2009

compliquée car les éléments A, B et C peuvent générer en plus d'autres éléments AA, BB, CC, BCA, CAB (Fig. 3.29, 3.30). La stratégie d'intégrer les surfaces horizontales a résolu la

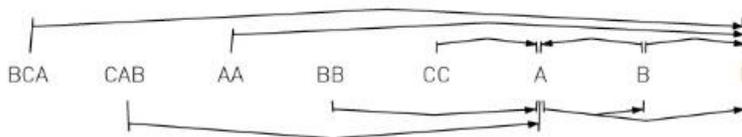


Figure 3.29 Supermanoeuvre, règle de L-système dans le projet, 2009

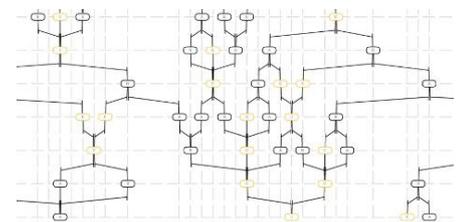


Figure 3.30 Supermanoeuvre, règle de L-système dans le projet, 2009

question de la surface habitable. L'augmentation du nombre d'éléments initiaux amène de la diversité.

Michael Hansmeyer a aussi travaillé sur la question d'adaptation de la notion L-système en architecture (Fig. 3.31). Sa stratégie est d'insérer plus de caractères architecturaux dans les éléments de départ. Les poutres, les colonnes et les volumes comptent parmi ces éléments de base. Une fois ces éléments assemblés par des règles précises. Le modèle final s'identifie d'emblée à un bâtiment. Par contre, cette « impatience » aboutit à un résultat très rigide. Dans le modèle physique de Supermatter, subsiste des incohérences certes dues à l'abstraction des éléments de base, mais il garde au final plus de potentiel.

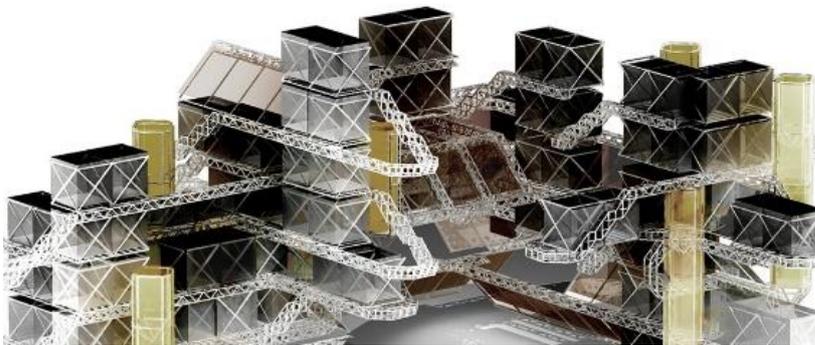


Figure 3.31 Michael Hansmeyer, *L-systems in Architecture*, 2003

#### 4) Les fractales aléatoires

Les fractales aléatoires sont générées par des processus stochastiques et non déterministes, les exemples plus connues sont : « Lévi flight », « percolation clusters », « self avoiding walks », « fractal lanscape », « trajectoires of Brownian motion » et « Brownian tree ».

## Turbulence

En météorologie, la fractale a été appliquée pour étudier des phénomènes comme les nuages, le vortex, la banquise, les vagues scélérates, la foudre et la turbulence (Fig. 3.32).

« La turbulence désigne l'état d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. La théorie de fractale a été souvent utilisée pour simuler ces effets. »<sup>67</sup>



Figure 3.32 Turbulence d'une aile d'avion

67. Faber Sperber, Robert Paris, « Univers fractal », Matière et Révolution, dimanche 18 octobre 2009,

URL :

<http://www.matierevolution.fr/spip.php>



Figure 3.33 Nicolo Casas, Turbulence, 2012

La parure Turbulence (Fig. 3.33, 3.34) est le fruit d'une collaboration entre Niccolo Casas et la styliste Leyre Valiente, pour la collection Malleus Malfiacarum. La complexité formelle émergente est obtenue grâce au recours des fractales.

En général, il existe trois façons de générer une structure fractale :



Figure 3.34 Nicolo Casas, une autre variante dans le projet Turbulence, 2012

- par expansion, en augmentant de plus en plus -de manière récursive- les formes générées,
- par contraction, en divisant en unités de plus en plus petites de la forme initiale,
- de façon totalement aléatoire par des processus stochastiques et non déterministes.

Pour la catégorie des systèmes de fonctions itérées, le processus contractant qui les caractérise fait écho aux tensions et contractions qui animent certaines œuvres architecturales baroques ou encore chez Michel-Ange, on se reportera à ce sujet aux thèses développées par C.G. Argan. Quant à l'autosimilarité, on laissera à Benoît Mandelbrot le soin d'en défendre son intérêt dans l'architecture :

*« Quel contraste entre l'ornementation du Palais Garnier et le dépouillement travail typique de Le Corbusier ! Pour ce dernier, il existe, certes, une structure globale, mais (comme chez Euclide) point de structure locale : au niveau du détail, il n'y a rien, si ce n'est, après quelques hivers, des veinures dues à la détérioration du ciment. Pour l'Opéra de Paris, c'est tout le contraire : qu'on l'examine du palais-Royal, de loin, d'assez loin, de près, de très près, et qu'on laisse l'œil glisser sur les vues sans intérêt, l'œil trouvera toujours où s'arrêter, et les vues auxquelles il s'arrêtera seront toutes de complication comparable. Ne reconnaît-on point-là le comportement même qui sert à définir les fractales ? Que signifient, dès lors, les lamentations des usagers de l'architecture, qui disent qu'une tour moderne n'est pas à l'échelle humaine, tandis qu'ils n'en veulent pas à l'Opéra, même s'ils ne trouvent pas nécessairement qu'il soit beau ? Je vois qu'une tour moderne*

*possède sa propre échelle, et une seule, indépendante de qui la regarde, tandis que, où que je sois, l'Opéra se met à mon échelle, et les bâtiments qui l'entourent se mettent à l'échelle de l'Opéra si je suis bien placé pour les examiner tous à la fois. Encore une fois, nous avons affaire à une « symétrie » au vieux sens grec.*

*Voici donc une nouvelle preuve que cette symétrie-là est nécessaire à la beauté, étant bien entendu qu'elle n'est nullement suffisante. Dans le contexte esquissé dans mes remarques, il devient caractéristique d'un certain style Beaux-Arts que le global (composition d'ensemble) et le local (finition de détail) ne sauraient pas vraiment être séparés. »<sup>68</sup>*

68. Benoit Mandelbrot, « Les fractales, les monstres et la beauté », le débat, no.24, mars 1983, p. 65

Quant aux fractales définies par une relation de récurrence, la méthode de génération la plus adoptée par les architectes numériques est le L-système, qui permet de générer des formes en expansion avec une relation de récurrence. Les deux projets, L-system in architecture et Supermatter sont les plus aboutis. La diversité des éléments de départ génère des formes architecturales non dépourvues d'élégance.

Les fractales aléatoires offrent une possibilité quasi infinie de générer des formes complexes, mais la connaissance toute relative des mécanismes du chaos ne permettent pas une application architecturale maîtrisée. Les formes créées par cette catégorie sont actuellement des objets de design assez éloignés de l'architecture.

### 3.1.2 Réaction-diffusion

#### A. Introduction

*« On suppose qu'un système de substances chimiques, dits morphogènes réagissant ensemble, et se diffusant à travers une membrane, est capable de rendre compte des principaux phénomènes de morphogenèse.*

*Un tel système, même s'il peut être à l'origine assez homogène, peut développer par la suite un modèle ou une structure autre en raison de l'instabilité de l'équilibre initial, déclenchée par des perturbations aléatoires. De tels systèmes de réaction-diffusion dans des situations d'anneaux cellulaires isolés sont examinés convenablement dans le détail en mathématique alors qu'ils le sont peu en biologie.*

*L'enquête vise surtout à comprendre l'apparition de l'instabilité. On constate qu'elle peut prendre six formes distinctes. Dans la plus intéressante, les vagues qui apparaissent sur l'anneau perdurent. Cela pourrait expliquer, par exemple, les motifs tentaculaires de l'Hydre présent sur les feuilles verticillées. Un système de réactions et de diffusion sur une sphère est aussi envisageable. Un tel système pourrait expliquer la gastrulation ... »<sup>69</sup>*

Cette modélisation mathématique de l'évolution des concentrations de substances spatialement distribuées appliquée à l'architecture présente l'intérêt d'une plasticité complexe fluide et porosive.

Elle permet de créer des formes qui se transforment au fil du temps : des motifs émergents apparaissant tout au long de sa morphogénèse. Ces résultats se manifestent surtout en trois dimensions où la porosité trouve sa véritable dimension

69. Alan M. Turing, « *The Chemical Basis of Morphogenesis* », *Biological Sciences*, vol.237, no.641, août 1952, p.5 (traduction personnelle)

architecturale et permet notamment de tisser des jeux subtils entre le dedans et le dehors.

L'exemple ci-après emprunté à Karl Sims de simulation de deux substances chimiques interagissant et se diffusant dans une grille 2D selon le modèle de Gray-Scott permet de mieux comprendre le phénomène. (Fig. 3.35)<sup>70</sup>

70. Karl Sims, *Reactio- Diffusion Tutorial*,

URL:

<http://www.karlsims.com/index.html>

1. Un produit chimique est ajouté avec un taux « flux » donné.
2. Deux B convertissent un A en un B comme si B se reproduit en utilisant A comme nourriture.
3. la substance B est retirée avec un taux « disparition » donné.

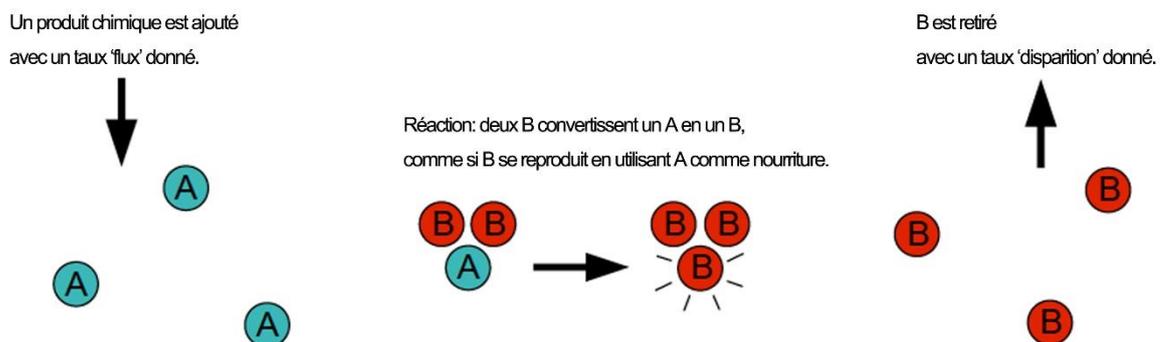


Figure 3.35 Schéma qui montre le principe du système à réaction-diffusion, créé par Karl Sims, traduction personnelle

La grille est tout le temps mise à jour en une équation simulant la concentration dans chaque cellule.

Des comportements étonnamment complexes peuvent être produits par des règles assez simples, et nous pouvons obtenir des résultats différents en ajustant les deux paramètres : taux d'alimentation et taux de disparition. Les résultats peuvent être (Fig. 3.36) visualisés en attribuant une couleur pour chaque substance : A est blanc et B est noir.

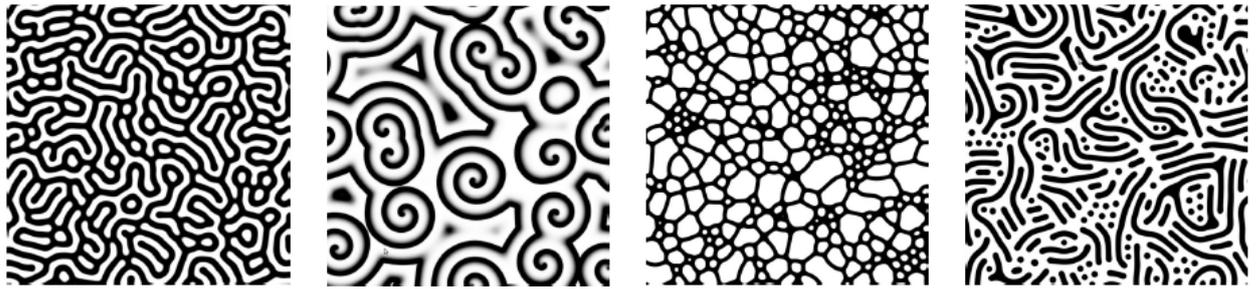


Figure 3.36 Certaines motifs créés par système à réaction-diffusion

La réaction a naturellement deux états stables une majorité de A dès lors qu'il n'est consommé par B. Beaucoup de B dès lors que A est rapidement converti en B. Mais des comportements intéressants apparaissent entre les zones « dominées » par A ou « dominées » par B. Certains motifs générés par des paramètres spécifiques ont été baptisés, par exemple, « Mitosis » (Fig. 3.37, 3.38) et « Coral growth » (Fig. 3.39).

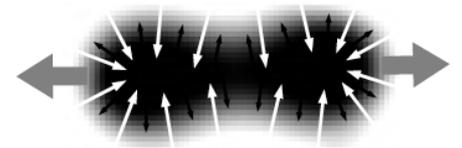


Figure 3.37 « Mitose »

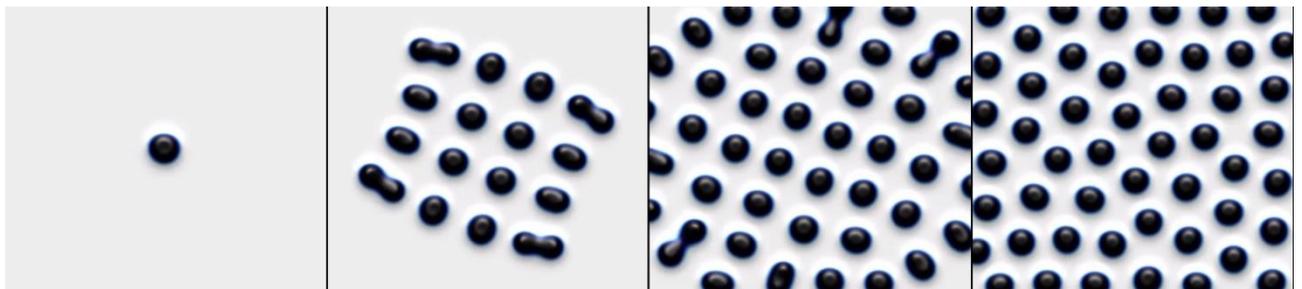


Figure. 3.38 Quelques itérations de configuration « Mitosis »



Figure. 3.39 Quelques itérations de configuration « Coral growth »

Si on ajoute certains autres facteurs dans ce processus, on peut obtenir d'autres effets comme :

« Grain » (Fig. 3.40a) : La diffusion se reproduit plus dans un sens que l'autre pour donner une orientation aux motifs résultants.

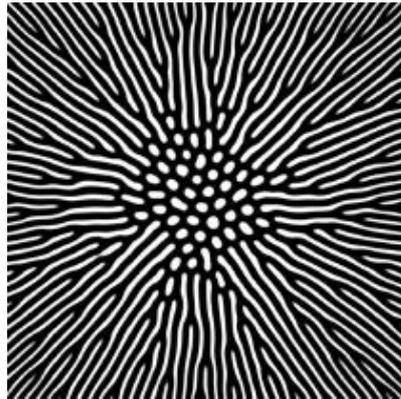


Figure. 3.40a « Grain »

« Style Map » (Fig. 3.40b) : l'alimentation et le taux de disparition peuvent varier dans la grille pour donner différents motifs dans les zones différentes.



Figure 3.40b « Style Map »

« Flow » (Fig. 3.40c) : les produits chimiques peuvent s'écouler à travers la grille pour donner différents effets dynamiques.



Figure 3.40c « Flow »

« Scale » (Fig. 3.40d) : la taille du motif change quand la vitesse de réaction est accélérée ou ralentie par rapport à la vitesse de diffusion.



Figure 3.40d « Scale »

En général, les systèmes à réaction-diffusion disposent d'un très haut niveau d'émergence grâce à la combinaison de nombreux paramètres, avec pour résultat des motifs graphiquement très variés. La question peut être posée de leur utilisation en architecture, c'est-à-dire au-delà du graphisme.

## B. Catégories et projets

### 1) Réaction-diffusion en 2.5 D

Le projet reTUR(n)NGmatter, 2010, de Dağhan Çam en collaboration avec Alexandre Kuroda, Karoly Markos et Shilpa Pattar, est une expérimentation réalisée le cadre du Workshop « reTUR(n)INmatter » de AADRL sous la direction de Alisa Andrasek (Biothing) et Jose Sanchez (Fig. 3.41). Il s'agit de créer des géométries complexes avec les capacités performatives de l'imprimante D-shape, capable d'imprimer en 3D des objets à très grande échelle en utilisant directement les matériaux de construction et non plus la résine <sup>71</sup>.

Le modèle de réaction-diffusion utilisé est celui de Gray-Scott (Cf. Chapitre 3.1.2a), modèle initié en 2D ; le plan en 2D se transformant au fil du temps comme toute réaction

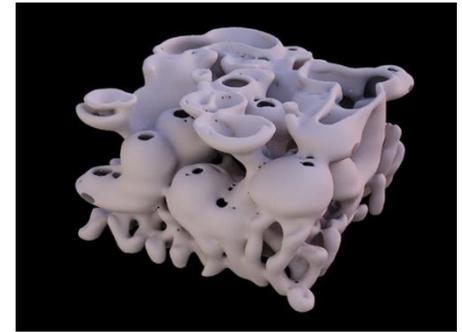


Figure 3.41 Dağhan Çam, reTUR(n)INGmatter, 2010

71. D-shape est une grande imprimante tridimensionnelle qui utilise stéréolithographie, un processus d'impression couche par couche, qui crée des objets analogues à la pierre avec un mélange du sable, l'eau de mer et liant à base de magnésium.

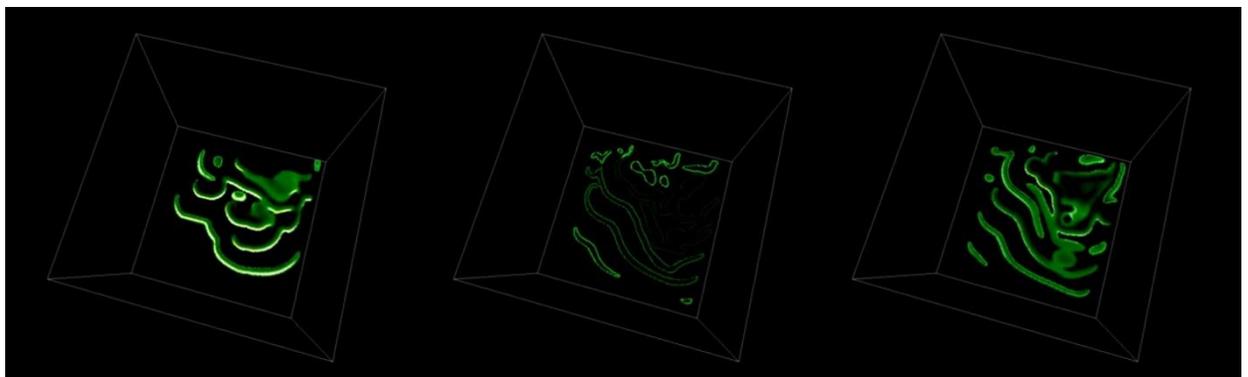


Figure. 3.42 Dağhan Çam, Trois stades extraits de la simulation de modèle Gray-Scott en 2D, 2010

chimique. (Fig.3.42)

La stratégie de Dağhan Çam et ses collègues est de superposer des plans générés pendant le processus de chaque itération. On sait que le processus de réaction-diffusion est un processus continu, donc, quand chaque couche se superpose en verticale, un modèle 3D avec des surfaces lisses peut être produit. (Fig.3.43)

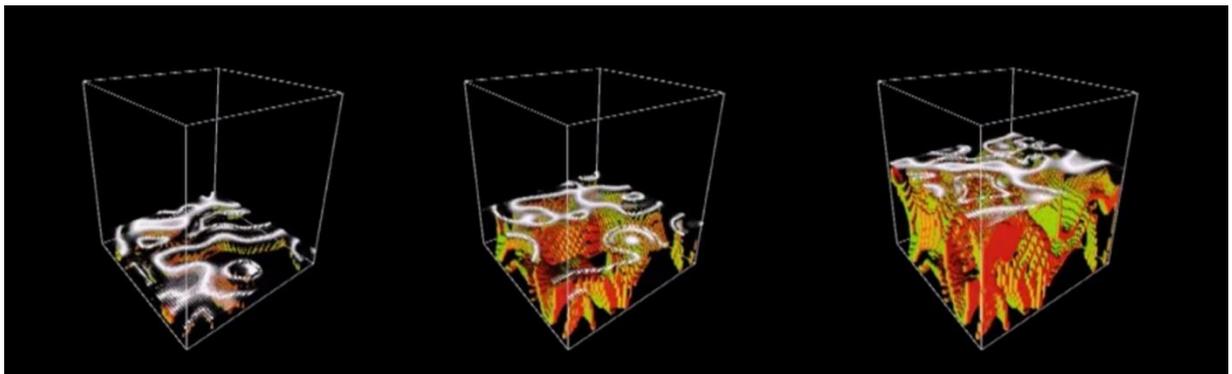


Figure 3.43 Dağhan Çam, Trois stades extraits de la simulation avec la stratégie de superposition, 2010

Le modèle n'étant pas généré directement en 3D, il appartient à cette famille intermédiaire entre la deuxième et troisième dimension : que d'autres appellent 2.5 D. Cette stratégie de superposition 2.5D peut s'expliquer par :

- la complexité de la simulation en 3D qui requiert des outils de calcul extrêmement puissants,
- la facilité de manipulation du modèle qui permet de faire jouer d'autres règles comme la superposition, la rotation, les changements d'échelle, la fractalisation.

Appliqué à l'architecture, le fait que ce modèle admette d'autres paramètres ou facteurs de génération, de transformation et de complexité lui confère un réel potentiel. Dans cette expérience, l'équipe a infléchi le modèle en y introduisant des facteurs externes comme la gravité, la force newtonienne et la lumière. (Fig.3.44)

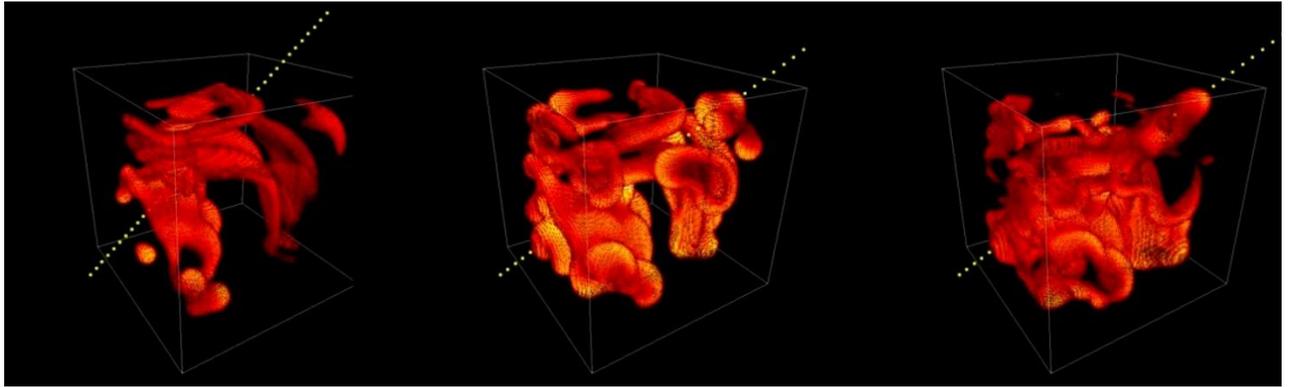


Figure 3.44 Dağhan Çam, *Trois stades extraits de la simulation qui représentent comment la force extérieure peut impacter la modèle*, 2010

Toutefois malgré tous ces efforts de transformation, persiste une autosimilarité importante. Enfin mais c'est le cas de la grande majorité de ces projets expérimentaux, la dimension constructive tout comme celle de l'habiter semblent absentes, ignorées.

## 2) Réaction-diffusion en 3D

Michael Hansmeyer a aussi utilisé modèle Gray-Scott pour son projet *Voxel-based Geometries*, 2009. C'est un projet de recherche qui explore des phénomènes d'émergence par le moyen technique d'une pixellisation en volume dite « voxel ».<sup>72</sup>

Cette simulation ne se contente plus d'utiliser le système réaction-diffusion comme un générateur de plan en 2D, elle représente le vrai processus de transformation de modèle Gray-Scott (Fig. 3.45).

Pour pallier la difficulté de simuler le processus du système à réaction-diffusion en 3D liée à la quantité considérable de données à calculer, Micheal Hansmeyer a recourt la technique « Voxel ».

72. Le voxel est la contraction du terme « volumetric pixel ».

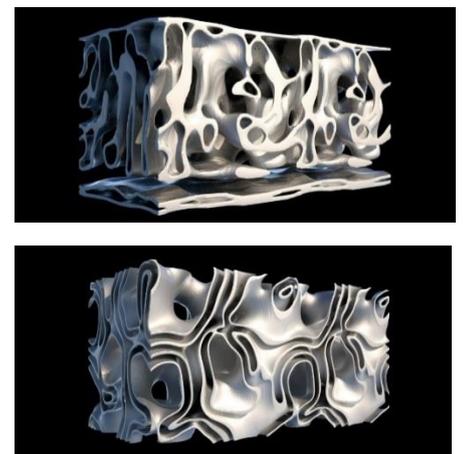


Figure 3.45 Michael Hansmeyer, *Voxel-based Geometries*, 2009

Ici, 216 000 voxels ont été utilisé (60 sur l'axe X, 60 sur l'axe Y et 60 sur axe Z) pour réaliser cette simulation. Cela permet de visualiser le modèle sans dépasser la capacité de calcul d'un ordinateur tout en préservant le caractère poreux de la structure générée. L'objectif de ce projet est d'étudier la structure spatiale qui émerge en 3D pendant le processus du système à réaction-diffusion. Même si la règle utilisée ici est très différente du projet précédent, une grande similarité règne entre les deux modèles générés. (Fig.3.46).



Figure 3.46 Michael Hansmeyer, *Trois stades extraits de la simulation du système à réaction-diffusion en 3D*, 2009

C'est-à-dire que, topologiquement, les deux projets ont produit l'un et l'autre des structures de grande porosité. Nous parvenons mal à expliquer cette parenté. Parce que le projet reTUR(n)NGmatter ne relève que partiellement de la règle de réaction-diffusion, l'autre étant la superposition, dispositif mixte qui tend à atténuer la morphogénèse propre au système à réaction-diffusion. On suppose que cette similarité structurelle tient à la technique de modélisation. En fait, les deux projets ont une stratégie de modélisation qui vise à avoir des surfaces courbes, lisses et continues à l'instar des phénomènes naturels où la ligne droite est absente.

Il y a un autre fait intéressant est que les recherches scientifiques sur le système à réaction-diffusion se focalisent plutôt le processus que sur les formes stables, définitives sur lesquelles s'arrêtent les architectes.

### 3) Réaction oscillante

Le projet Saturation, 2012, de Dominik Strzelec se base sur une réaction de Belousov-Zhabotinsky (Fig. 3.47) pour construire son modèle en 3D. C'est une réaction oscillante<sup>73</sup> qui a été mise en lumière la première fois en 1950 par le chimiste russe Belousov. En mélangeant cinq composés courants dans l'eau, à température ambiante, on n'atteint pas directement l'état d'équilibre ; la solution oscille entre deux états, avec une grande régularité.

Le résultat produit une forme organique qui ressemble beaucoup à la Fig. 3.48 créée par le système Gray-Scott. Cette similarité s'explique relativement aisément car, à micro échelle, les réactions chimiques sont toujours successives ; leur transposition en 3D génère des surfaces continues et gauches.

Différents types de réactions chimiques produisent donc topologiquement le même type de modèles. Les règles sont différentes mais les résultats se ressemblent. Reste qu'à travers ces expériences les questions spécifiquement architecturales semblent absentes : qu'en est-il par exemple de l'habitabilité des espaces produits, de la constructibilité des structures générées ?

Dominik Strzelec a essayé une stratégie très simple : insérer des planchers horizontaux directement dans le volume.

(Fig. 3.49) L'insertion des planchers se conforme à la structure alvéolaire, deux questions se posent : ce respect de

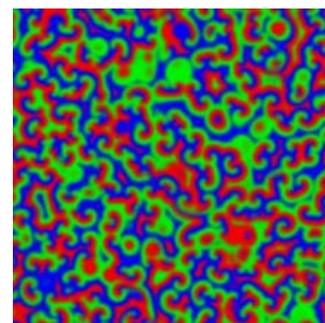


Figure 3.47 Simulation informatique d'une réaction de Belousov-Zhabotinsky telle qu'elle pourrait apparaître dans une boîte de Petri.

73. Une réaction oscillante est un mélange complexe de composés chimiques dont la concentration d'un ou plusieurs composants présente des changements périodiques.

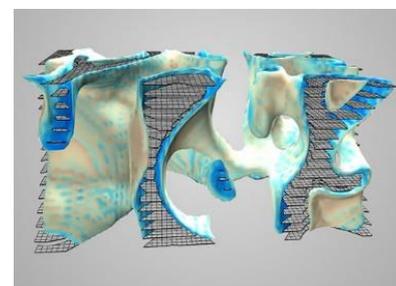


Figure 3.48 Dominik Strzelec, Modèle généré par la réaction de Belousov-Zhabotinsky, 2012

la forme générée tend à minimiser cette opération et par là-même à contenir la dimension horizontale dans une soumission la privant de la sorte de ses propres potentialités.



*Figure.3.49 Dominik Strzelec, Trois stades extraits de la simulation à base de réaction Belousov-Zhabotinsky avec des planchers horizontaux, 2012*

Mais cela revient aussi à contraindre la structure, à la figer, et interdire toute évolution, toute flexibilité. La structure générée par une règle précise rend difficile les modifications ou les ajustements.

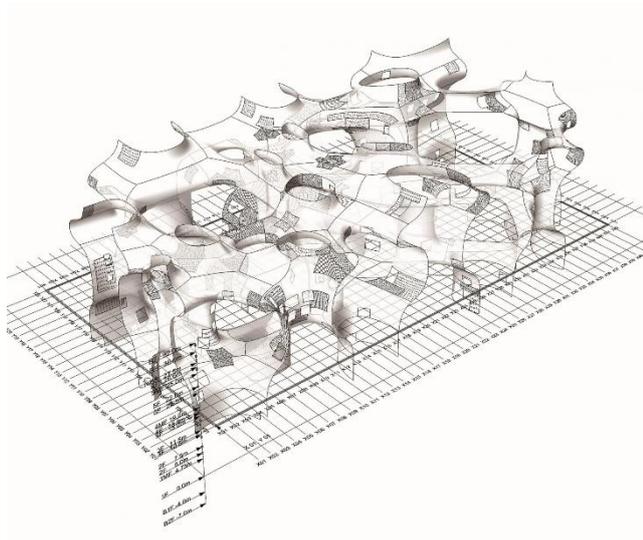
L'algorithme de réaction-diffusion permet la génération de structures courbes gauches, continues, et qui ont fait la renommée de certains architectes et en sont devenues leur signature. (Fig. 3.50)

La transposition 3D de cet algorithme produit des structures alvéolaires, qui ne sont pas sans rappeler les projets de Toyo Ito. (Fig. 3.51)

Ces structures complexes opèrent donc sur des registres qui ont déjà acquis une certaine notoriété. Un de leurs aspects les plus prometteurs est les effets de texture qu'elles engendrent, leur porosité.



*Figure 3.50 Zaha Hadid, Abu Dhabi Performing Arts Centre, 2007*



*Figure 3.51 Toyo Ito, Taichung metropolitan opera house, 2009*

### 3.1.3 - Automate cellulaire

#### A. Introduction

L'« Automate Cellulaire » (AC) est un système auto-génératif, concept créé en 1950 par Stanislaw Marcin Ulam (1909-1984), mathématicien polonais et John Von Neumann (1903-1957), mathématicien hongrois. L'automate cellulaire est à la fois un modèle de système dynamique et un modèle de calcul. Après la naissance de l'ordinateur durant les années 40, Von Neumann étudie les processus auto-réplicatifs, et entreprend de les simuler au travers de programmes. Au cours de ses recherches, il crée le concept d'« Automate Cellulaire » en collaboration avec Ulam.<sup>74</sup>

74. Li Biao, *Architectural Generative Design: Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design*, Nanjing, Southeast University Press, 2012, p. 81

AC consiste en une grille régulière de « cellules » contenant chacune un « état » initial. Chaque cellule a toujours un état spécifique dans un temps précis. Un système AC comprend au moins :

- une grille,
- un voisinage,
- l'état des cellules à moment T,
- une règle de transformation.

La grille est l'environnement où se situe l'ensemble des cellules évoluant au cours du temps.

Le voisinage est la situation de la cellule qui détecte la relation avec des autres cellules autour d'elle

L'état de cellule représente la valeur d'une cellule, souvent dans un système AC, cet état est représenté en logique booléenne par 0 ou 1. 0 signifie « morte », 1 signifie « vivante ». La règle de transformation est la partie centrale d'un système AC qui décide l'état de futur d'une cellule en

analysant l'état actuel de cette cellule et des états actuels de ses voisins. Au fil du temps, chaque cellule dans la grille voit son statut évoluer selon l'état de ses voisins.

Un système AC possède trois caractères principaux :

Un calcul en parallèle : à chaque itération, des calculs simultanés procèdent à la remise à jour de l'ensemble des cellules.

Une relation locale : chaque cellule ne se modifie qu'à travers ses relations avec son environnement proche, ses modifications n'impactent pas le système dans sa globalité.

Une homogénéité : toutes les cellules obéissent à une même règle.

Le système AC existe dans de nombreuses dimensions : en 1 dimension, 2 dimensions, 3 dimensions et même en des dimensions supérieures. L'application d'AC dans l'architecture opère essentiellement en 1,2 et 3 dimensions. La simplicité de sa règle opératoire, sa puissance de calcul font que ce système a été utilisé dans bon nombre de domaines scientifiques comme la modélisation de phénomènes physiques, biologiques, la simulation de comportements collectifs en sociologie.

AC est le premier prototype de vie artificielle ainsi qu'une branche principale des Systèmes Complexes. C'est sans doute parce qu'il permet la génération d'une quantité importante de motifs et de formes qu'il retient en ce moment l'intérêt des architectes : une règle simple, élémentaire suscitant à profusion des formes émergentes.

Wolfram a défini quatre classes dans lesquelles les automates cellulaires et plusieurs autres modèles de calcul simples peuvent être divisés en fonction de leur

comportement. Alors que les études antérieures avaient tendance à identifier le type de modèles par des règles spécifiques, la classification de Wolfram fut la première tentative de classer les règles elles-mêmes selon leur degré de complexité.<sup>75</sup>

Classe 1 : Presque toute configuration initiale conduit à un état homogène. Il est impossible de construire des motifs stables périodiques. (Fig. 3.52a)

Classe 2 : des structures stables ou périodiques émergent, mais rien de plus. (Fig. 3.52b)

Classe 3 : Comportement chaotique avec des motifs aperiodiques. A long terme les fréquences d'apparition des différents motifs se stabilisent. (Fig. 3.52c)

Classe 4 : « émergence » de structures complexes capables d'osciller, de se mouvoir, voire de persévérer plus ou moins dans leur auto-organisation malgré des perturbations structurelles. Le jeu de la Vie en est un parfait exemple. (Fig. 3.52d)

Les automates cellulaires les plus simples sont des automates cellulaires unidimensionnels (automates cellulaires élémentaires). Une grille unidimensionnelle de cellules ne pouvant prendre que deux états (« 0 » ou « 1 »), avec un voisinage constitué, pour chaque cellule, d'elle-même et des deux cellules qui lui sont adjacentes. Les motifs sont générés en superposant toutes les lignes de chaque itération. Les 4 images (Fig.2.52a, b, c, d) sont des exemples pour expliquer les 4 classes de Wolfram.

75. WOLFRAM Stephen, « Universality and Complexity in Cellular Automata », *Physica D*, no.10, janvier 1984, p.8



Figure 3.52a Règle 232

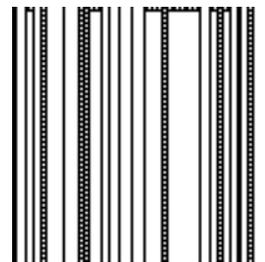


Figure 3.52b Règle 108



Figure 3.52c Règle 22

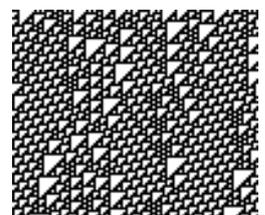


Figure 3.52d Règle 110

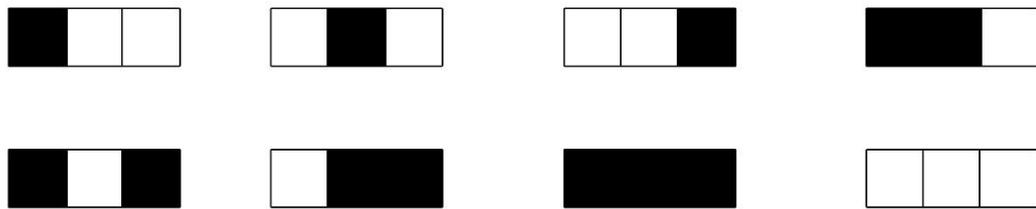


Figure 3.53 Les 8 possibilités pour les automates cellulaires élémentaires.

Les automates cellulaires élémentaires sont sans doute ceux qui permettent le mieux d'expliquer le mécanisme de l'automate cellulaire.

En voici un exemple :

« 0 » signifie une cellule « morte » qui est représentée en blanc, « 1 » signifie une cellule « vivante » qui est représentée en noir. En une dimension, chaque cellule a deux « voisins », donc chaque cellule possède les différentes conditions de ses voisins. Il y a au total  $2^3=8$  possibilités.

(Fig.3.54)

Si la règle d'évolution est définie par la table suivante :

Itération initiale (t)	111	110	101	100	011	010	001	000
Itération suivante (t+1)	0	0	0	1	0	1	1	0

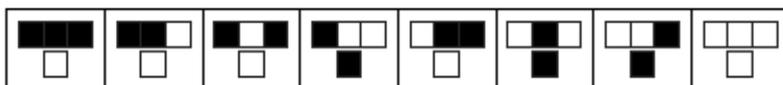


Figure 3.54 La règle d'évolution visualisée

Et si l'état initial est (Fig. 3.55) :



Figure 3.55 Etat initial

Nous obtiendrons une forme issue de 24 itérations (Fig. 3.56)

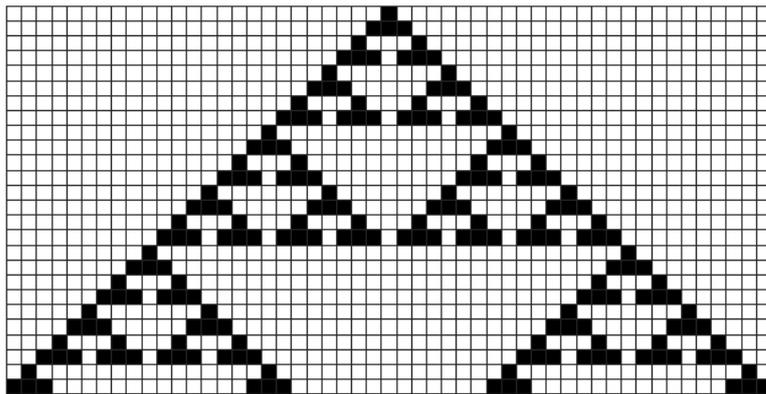


Figure 3.56 Le motif obtenu dans 24 itérations

L'exemple mentionné faisait état de la règle la plus simple, si on donne chaque cellule à 5 états (peut être représenté par différents couleurs par exemple), l'AC élémentaire peut avoir plus que  $10^{17}$  possibilités. Et dans 2D ou 3D, la possibilité sera encore plus grande.

## B. Catégories et projets

### 1) Automate cellulaire en 2D

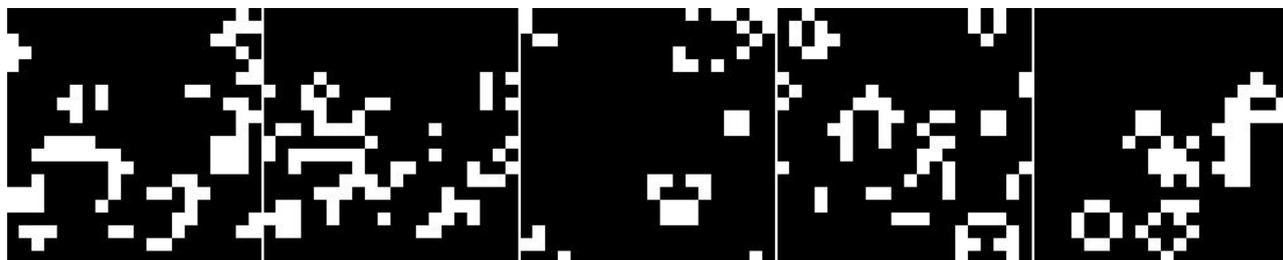


Figure 3.57 Quelques étapes d'évolution du jeu de la vie à partir d'une configuration initiale choisie au hasard

Le jeu de la vie (Fig. 3.57), automate cellulaire imaginé par John Horton Conway en 1970, est le plus connu de tous les automates cellulaires. C'est un automate bidimensionnel où chaque cellule peut prendre deux valeurs (« 0 » ou « 1 », on parle plutôt de cellule « vivante » ou « morte ») et où son état futur est déterminé par son état actuel et par le nombre de cellules vivantes parmi les huit qui l'entourent :

Si la cellule est vivante et entourée par deux ou trois cellules vivantes, elle reste en vie à la génération suivante, sinon elle meurt.

Si la cellule est morte et entourée par exactement trois cellules vivantes, elle naît à la génération suivante.

D'apparence simple, ces règles font émerger une forte complexité.

Le Centre vétérinaire pour la faune indigène australienne (Fig. 3.58) conçu en 2006 par Minifie Nixon est un des premiers projets à utiliser la notion d'automate cellulaire. Une connaissance limitée de ce système et peut-être des outils de calcul moins performants qu'aujourd'hui font que le motif généré par AC n'a été utilisé que comme le principe de calepinage de la façade. Bien que l'auteur ne précise pas le



Figure 3.58 Minifie Nixon, La façade de l'entrée, 2006

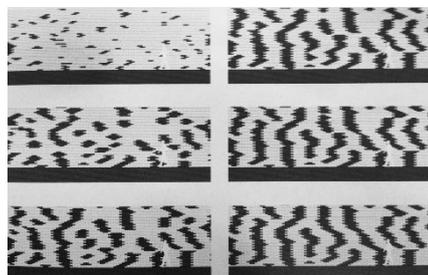


Figure 3.59 Minifie Nixon, Le motif généré par l'automate cellulaire, 2006

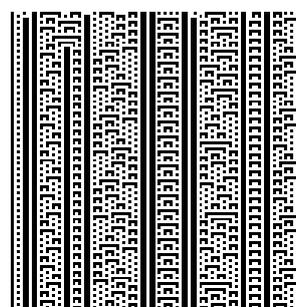


Figure 3.60 Automate cellulaire élémentaire : Règle 73

type d'automate cellulaire utilisé, on relèvera la forte similarité avec l'automate cellulaire élémentaire. Avec le schéma (Fig. 3.59 et Fig. 3.60).

## 2) Automate cellulaire en 2.5D

Il est évident que l'automate cellulaire en 2D est plus facile à maîtriser qu'en 3D. L'architecte Alisa Andrasek (Biothing) essaye une stratégie entre les deux en créant un système d'automate cellulaire en 2D pour le transformer par la suite en 3D.

CA04, 2008 de Biothing (Fig. 3.61) est un projet de recherche rapide sur le système d'automate cellulaire. Seules 3 images illustrent ce projet sur le site internet de l'architecte, et elle-même est peu disert à son sujet. Mais son titre « CA04 » laisse fortement présumer que c'est un projet basé sur l'automate cellulaire (CA est l'abréviation de « Cellular automaton » en anglais).

Le projet entreprend de produire un modèle en 3D à partir d'automates cellulaires en 2D. Les informations sont représentées par les longueurs extrudées de chaque cellule afin de créer au final un relief sur la surface. Ce modèle n'est pas à l'évidence un projet d'architecture mais il a permis à l'architecte de maîtriser le script de ce système et de s'en référer par la suite.

Comme dans le projet Mesonic Fabrics, 2007-2009 (Fig. 3.62), Biothing classé et analysé dans la famille Système multi-agents (Cf. chapitre 3.1.5 p.144) qui utilise ce système d'extrusion pour en constituer le socle.



Figure 3.61 Biothing, CA04, 2008



Figure 3.62 Biothing, Mesonic Fabric, 2007-2009

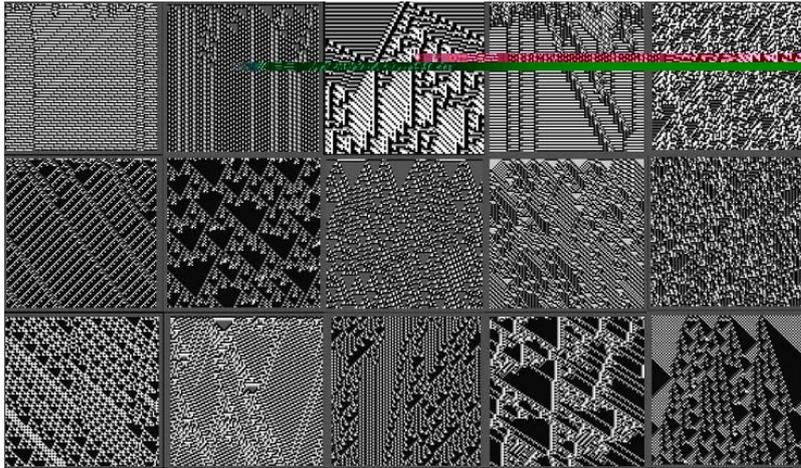


Figure 3.63 Biothing, Des motifs générés par Automates cellulaires Classe 4, 2007-2009

L'agence Biothing a choisi plusieurs automates cellulaires élémentaires de 4ème classe comme générateur de motifs de base (Fig. 3.63). Ces règles permettent de créer des émergences de structures complexes capables d'osciller, de se mouvoir et persévérer dans leur auto-organisation malgré des perturbations structurelles.

Conçu avec ce principe d'extrusion 2.5D initié dans le projet CA04, ce socle qui ressemble à une plage étale, plus ou moins monotone est en fait un relief abstrait et très complexe, structuré d'une myriade de stries vibrant de leurs infimes variations.

### 3) Automate cellulaire en 3D

Comme l'automate cellulaire en 2D se base sur une grille composée de cellules carrées (il existe aussi une grille à cellules hexagonales de type nid d'abeilles), l'environnement d'automate cellulaire en 3D devient dans ce cas un espace composé par des cubes qui peuvent être appelés « vivant » quand ils sont pleins et « morts » quand ils sont vides. La plupart des recherches qui utilisent l'automate cellulaire en



Figure 3.64 Modèle généré par « RABBIT » qui est un plug-in de Grasshopper

3D créent des formes dont les assemblages rappellent le jeu de construction Lego. (Fig. 3.64)

Dans son projet « Voxel-based Geometries : Cellular Automata » de 2009, Michael Hansmeyer a recours à l'algorithme de « marching cubes »<sup>76</sup> pour simuler le modèle d'automate cellulaire. (Fig. 3.65)

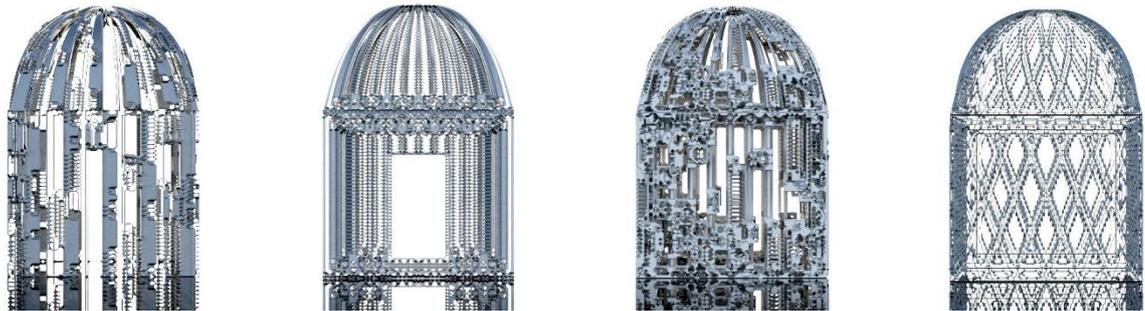


Figure 3.65 Michael Hansmeyers, *Quatre variantes des formes générées, Voxel-based Geometries, 2009*

Les applications principales de cet algorithme (Isosurface)<sup>77</sup> sont du domaine de la visualisation médicale, comme la reconstruction de surfaces à partir des images issues de scanners ou d'IRM. Cette technique évite le problème des discontinuités et hachures de la pixellisation en permettant un rendu plus lisse des surfaces.

Le résultat s'apparente à un kiosque de jardin « orientalisant » et est en tout cas très éloigné des assemblages cubiques des modèles les plus courants.

Les structures de « Voxel-based Geometries » étant très décoratives, leurs règles de génération n'ont peu ou pas de rapport avec les problématiques d'espacement inhérentes au projet architectural, ce constat vaut pour la plupart des expérimentations réalisées avec l'automate cellulaire.

76. On peut considérer une isosurface comme l'analogie en 3D d'une courbe de niveau. C'est en fait le lieu des points de l'espace pour lesquels une certaine fonction (par exemple la pression, la température, la vitesse, la densité, etc.) est constante. En d'autres termes, c'est la courbe de niveau d'une fonction continue dont le domaine est l'espace ambiant.

77. Les « marching cubes » sont un algorithme d'infographie publié à la conférence SIGGRAPH 1987 par Lorensen et Cline. Ils permettent de créer un objet polygonal à partir d'un champ scalaire en trois dimensions (son unité élémentaire est souvent appelée voxel), en principe créé par approximation d'une isosurface.

#### 4) La cellule habitable

Dans son projet « Cube 1001 » en 2007, Biao Li (Fig. 3.66). a considéré les cellules du système d'automate cellulaire comme des unités d'habitations et non plus comme dans les exemples précédents des éléments de constructions, briques, composants extrudés, etc.



Figure 3.66 Biao Li, Cube 1001, 2007

Considérant que la règle d'un système d'automate cellulaire régit essentiellement la relation entre les cellules, Biao Li se concentre sur les interfaces entre vides et pleins en désignant les cellules pleines comme des espaces intérieurs et les cellules vides comme des espaces extérieurs. (Fig. 3.67).

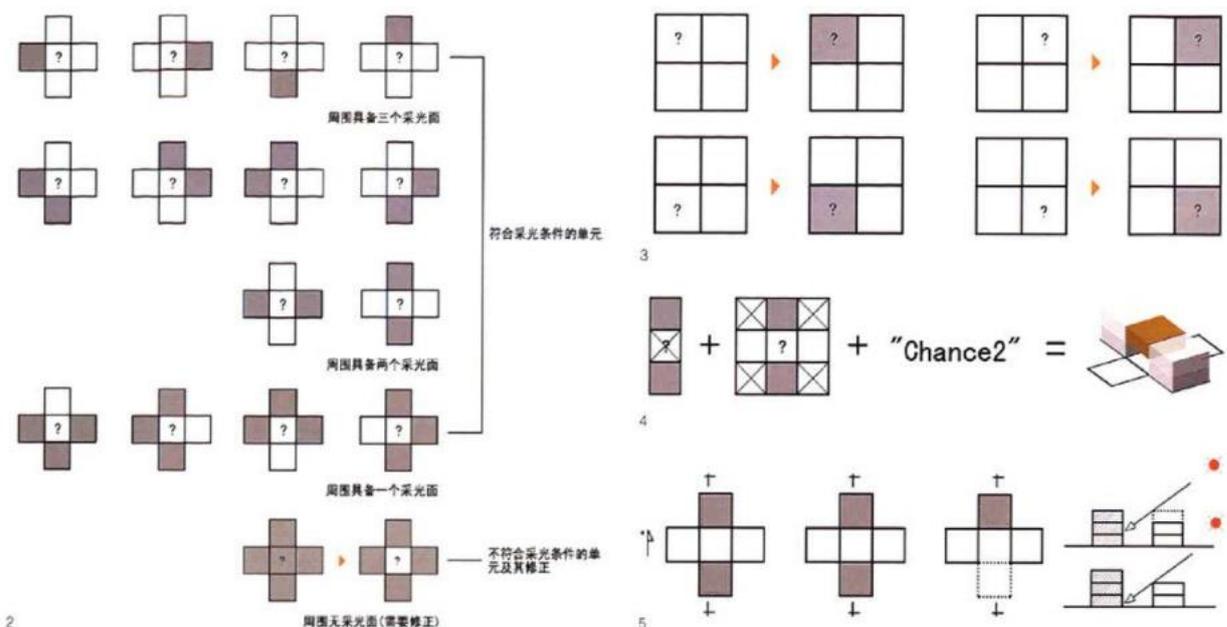


Figure 3.67 Biao Li, Règle d'automate cellulaire utilisée dans le projet, 2007

Les cellules doivent avoir au moins un bord qui ouvre à l'extérieur (une cellule noire doit être attachée à au moins une cellule blanche) pour qu'elle soit accessible et avoir de la lumière. Et quand une cellule est entourée complètement par des cellules noires, elle se transforme à une cellule blanche (elle devient une cour intérieure).



Figure 3.68 Biao Li, *Des motifs générés par l'automate cellulaire*, 2007

A partir de cette règle, les motifs générés (Fig. 3.68) aboutissent à trois types de figure : carrée (cellule unique), rectangulaire composée de deux cellules, en « L » composée de trois ou quatre cellules.

Chaque figure abrite une cellule d'habitation avec des différentes positions pour les accès et les ouvertures. (Fig. 3.69) l'ensemble de ces éléments réinséré dans le motif généré crée la base d'un lotissement.

La génération de ce modèle en hauteur par empilement de niveau procédera de la même règle mais le souci d'offrir de bonnes conditions d'éclairage naturel aux cellules d'une part et de satisfaire à leurs contraintes structurelles d'autre part conduisent à introduire d'autres paramètres.

Il existe à ce jour des approches très différenciées de l'application de l'automate cellulaire en architecture, elles interviennent à différentes échelles. Ce peut être un élément décoratif comme dans le Centre vétérinaire pour la faune indigène australienne, un élément constructif comme dans « Voxel-based Geometries », ou un générateur de cellules d'habitation à grande échelle comme dans « Cube 1001 ».

Dans ce dernier exemple, les agencements obtenus résultent d'une règle topologique relativement simple. Il est permis de s'interroger sur l'impact que pourrait avoir la complexification de cette dernière en proposant d'autres variantes aux cellules d'habitation relativement figées.



Figure 3.69 Biao Li, *Des différents types d'unité d'habitation*, 2007

### 3.1.4 Algorithme évolutionniste

#### A. Introduction

Les algorithmes évolutionnistes ou algorithmes évolutionnaires (evolutionary computation en anglais), sont une famille d'algorithmes s'inspirant de la théorie de l'évolution de Darwin pour résoudre des problèmes divers. Ils font ainsi évoluer un ensemble de solutions à un problème donné, dans l'optique de trouver les meilleurs résultats. La grande majorité de ces méthodes est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation.

L'algorithme génétique (AG) a été créé par John Holland et ses collègues aux États-Unis au cours des années 60' alors qu'ils étudiaient l'Automate Cellulaire. Jusqu'en 1985 date de la première conférence mondiale sur les algorithmes a lieu à l'université Carnegie Mellon, les recherches sur l'AG restent au stade de la théorie. Puis avec le développement des capacités de calcul des ordinateurs et l'afflux important de demandes en application, l'AG commence à rentrer dans le champ pratique. En 1989, est créé Evolver : premier AG commercialisé. Par la suite, de nombreux AG sont inventés et appliqués dans des recherches scientifiques variées.<sup>78</sup>

*78. MITCHELL Melanie, An Introduction to Genetic Algorithms, Cambridge, MIT Press, 1996, p.3*

La nature source importante d'inspiration pour l'homme va avec la bionique voir se développer dans les années 50' des recherches qui s'emploient à étudier les mécanismes de fonctionnement des organismes vivants et évolutifs afin de pouvoir les appliquer aux créations humaines.

Bien que ne disposant pas d'une méthode de programmation, ces recherches essayaient d'appliquer le principe d'AG à la science informatique.

Les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Ils offrent aux problèmes des solutions optimisées.

L'algorithme génétique est un processus analogue au processus naturel de l'évolution au moyen des mathématiques. John H. Holland, dans son livre « Adaptation in natural and artificial systems » propose le principe d'algorithme génétique pour la première fois qu'il développe par la suite avec ses élèves.<sup>79</sup>

L'évolution biologique procède par croisement et mutation entre les chromosomes, l'algorithme génétique propose de résoudre des problèmes par évaluation, sélection, mutation, croisement. Tout comme dans la nature, l'algorithme génétique ignore le problème lui-même. Tout ce qu'il fait (à l'instar de la nature) est d'évaluer chaque chromosome généré par l'algorithme, et choisir à partir de leur faculté adaptative les chromosomes les plus performants, ceux qui ont le plus de possibilités de reproduction. Dans l'algorithme génétique, des codes générés de façon aléatoire, les chromosomes, forment la population initiale ; la manipulation génétique sélectionne les individus selon la valeur de leur taux d'adaptation, en éliminant ceux à faible valeur pour ne conserver ceux qu'à haute valeur. Cette première manipulation génétique peut selon le même processus engendrer une nouvelle génération. C'est le principe de base de l'AG (algorithme génétique). (Fig. 3.70)

Aujourd'hui, les algorithmes génétiques ont été largement étudiés dans les écoles d'architecture : des logiciels et des plug-ins ont été développés et se constituent comme une plate-forme de recherche. 'Galapagos' en est un exemple typique, 'Galapagos' est un script préétabli qui apparaît à

79. John H Holland., *Adaptation in Natural and Artificial Systems, An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence, Cambridge, MIT Press, 1992, pp.1-19 [1ère ed. The University of Michigan, 1975]*

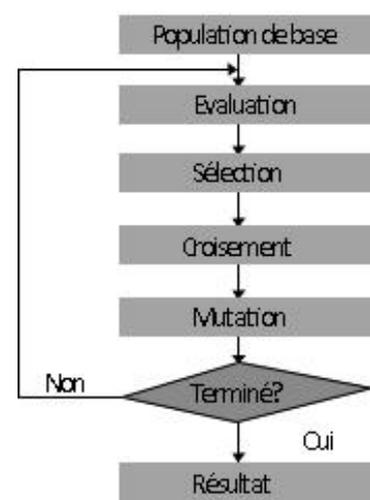


Figure 3.70 Processus d'AG

l'écran sous la forme d'une batterie automobile ; intégré dans 'Grasshopper' (un plug-in de Rhino –logiciel de modélisation), il permet l'application de l'AG et la possibilité de réaliser des modèles ou des maquettes virtuelles selon la valeur de la faculté d'adaptation des différents composants du projet architectural.

Cet exemple simple permet de mieux comprendre l'application d'algorithmes génétiques dans l'architecture.

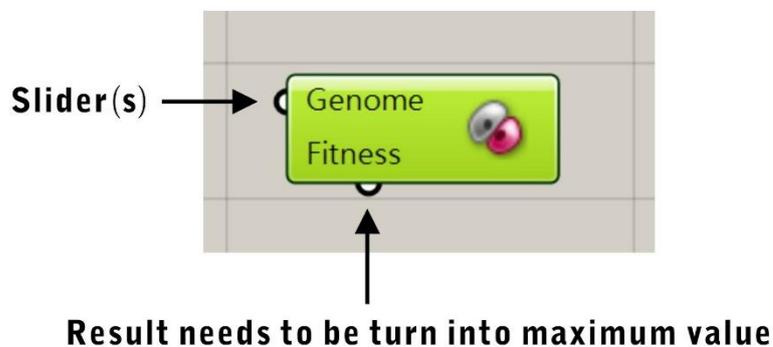


Figure 3.71 La « batterie » dans Grasshopper

La « batterie » (Fig. 3.71) d'algorithme génétique est composée de deux parties : le génome (groupe de chromosomes) et la valeur de la faculté d'adaptation (fitness). Il est nécessaire pour engager le processus de connecter la sortie 'Génome' avec une base de donnée qui va générer le premier groupe initial permettant d'initier l'AG. La sortie 'Fitness' (la valeur de la faculté d'adaptation) a besoin d'une règle pour sélectionner des individus dans chaque génération.

Il est possible d'expliquer ce processus en divisant la figure en 5 parties. (Fig. 3.72)

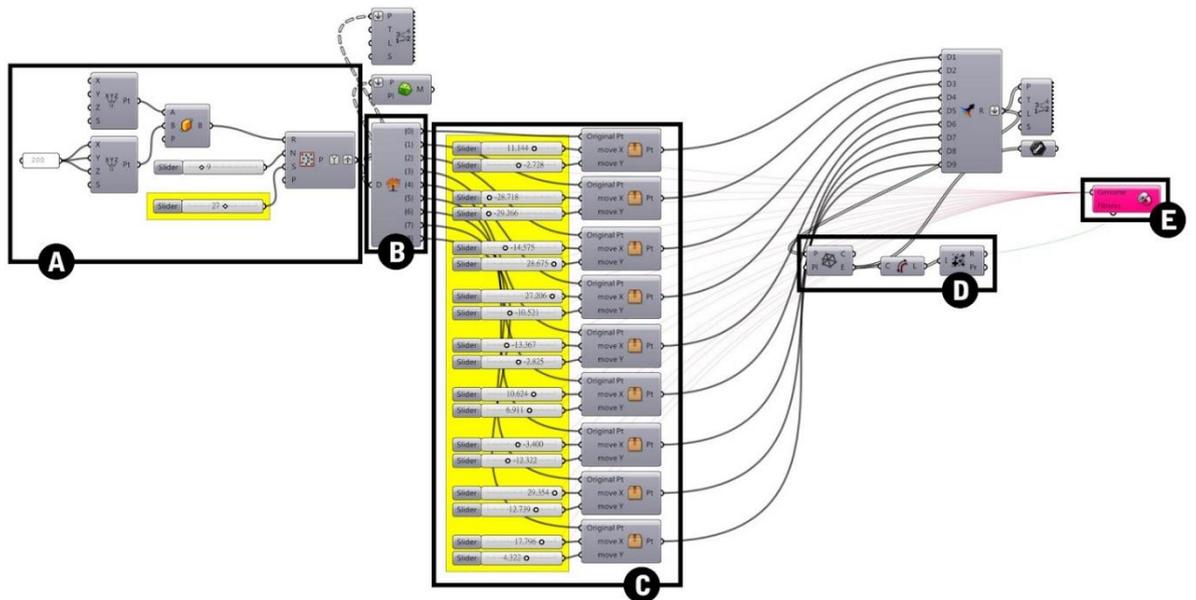


Figure 3.72 Schéma qui décompose le processus de l'AG dans 5 parties

Partie A : Etablir neuf points aléatoires dans une surface rectangulaire. (Fig. 3.73a)

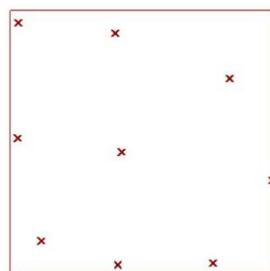


Figure 3.73a

Partie B : Numéroté les neuf points pour mieux se repérer.

(Fig. 3.73b)

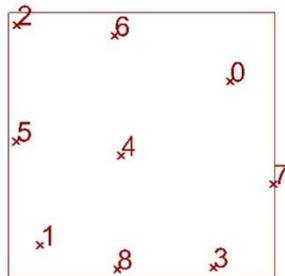


Figure 3.73b

Partie C : Permettre à chaque point de se déplacer selon les axes orthogonaux X et Y, avec un déplacement limité à 30 unités. Chaque point a deux variantes (ses coordonnées en X et Y), neuf points ont 18 variantes au total. Ces variantes seront connectées au 'Génome'. (Fig. 3.73c)

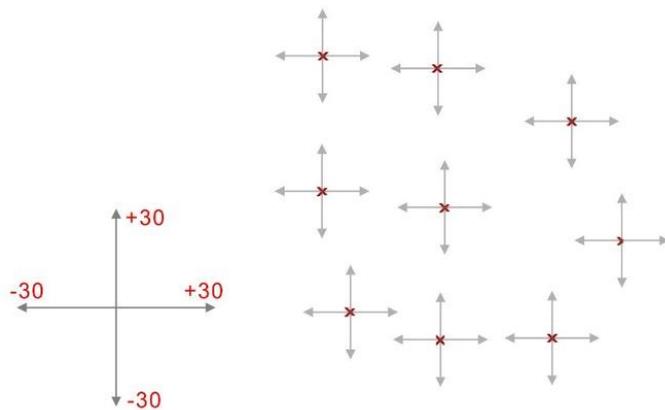


Figure 3.73c

Partie D : Un réseau est créé en reliant les points par composant « Delaunay »<sup>80</sup> dans Grasshopper. L'objectif est de disposer d'une longueur maximum de la somme de tous

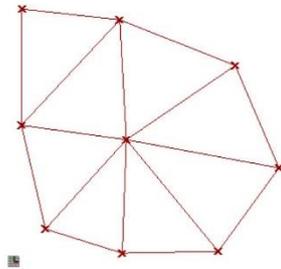


Figure 3.73d

les segments, avec comme contrainte un déplacement limité de chaque point de plus ou moins 30 selon les axes X et Y. Le résultat de la longueur de la somme de tous les segments est connecté à « fitness » (la valeur de la faculté d'adaptions). (Fig. 3.73d)

80. plug-in permettant de relier les points par triangulation

Partie E : Connecté à la batterie Galapagos, les calculs sont engagés, et s'il n'est pas fixé un temps limite, ce processus va poursuivre son évolution, tout comme le processus d'évolution de la nature. (Fig. 3.73e)

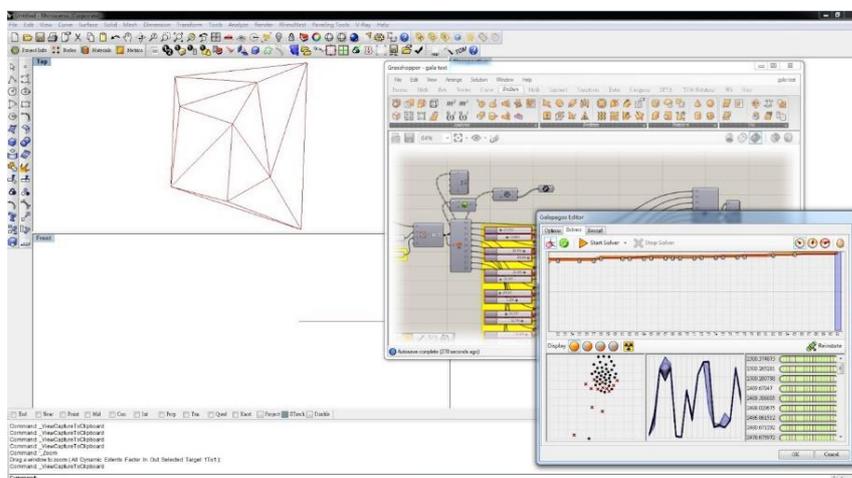


Figure 3.73e

Si toutefois au bout de 5 minutes, on choisit d'arrêter le processus, on obtiendra le résultat tel qu'illustré à droite. Le réseau a été optimisé de sorte à obtenir une longueur maximale de la somme de tous les segments. Sachant que ce résultat n'est pas définitif et qu'il n'est pas non plus unique. (Fig. 3.73f)

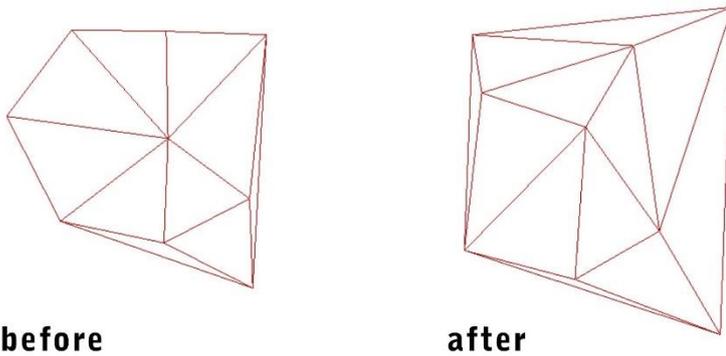


Figure 3.73f

Jusqu'à présent, il n'est guère possible d'avoir une vue globale de l'algorithme génétique. Les recherches avec l'AG dans l'architecture n'en sont qu'à leur début, il existe des projets générés par l'AG permettant l'optimisation des surfaces, orientations ou volumes etc.,

Ces exemples seront explicités dans des fiches suivantes.

## B. Catégories et projets



Figure 3.74 Les solutions ESO d'un objet suspendu dans l'air sous son propre poids

### 1) Optimisation structurelle évolutive (ESO)

L'optimisation structurelle évolutive (ESO, Evolutionary structural optimisation en anglais) a été proposée initialement en 1992 par Mike Xie et Grant Steven (Fig. 3.74). Il s'agit d'une procédure récursive itérative qui utilise l'analyse par éléments finis pour découvrir le critère de Von Mises de l'énergie de déformation de chaque élément dans une structure.<sup>81</sup> Au départ, on donne à un « cube » d'éléments virtuels finis quelques propriétés de matériaux réels, par exemple celles de la pierre, de l'acier ou du béton, et certaines charges et contraintes sont appliquées : la gravité, les points d'appui, etc. Après analyse, les éléments d'enregistrement de l'élasticité situés en dessous d'un certain seuil sont supprimés. Cette méthode d'analyse puis d'élimination des éléments à l'élasticité la plus faible est ensuite poursuivie de manière récursive à maintes reprises afin d'optimiser une structure utilisant le moins de matériaux possibles.

Dans l'exemple d'une optimisation structurelle évolutive d'une table, on peut voir comment l'algorithme transforme la structure d'une table en ajoutant ou supprimant de la matière pour l'adapter à la charge qu'elle aura à supporter, à la gravité et parvenir à sa meilleure économie (Fig. 3.75).

81. XIE Y.M., FELICETTI P., TANG J.W., BURRY M.C., « Form Finding for Complex Structures Using Evolutionary Structural Optimization Method », *Design Studies*, vol.26, no.1, janvier 2005, pp. 55-72

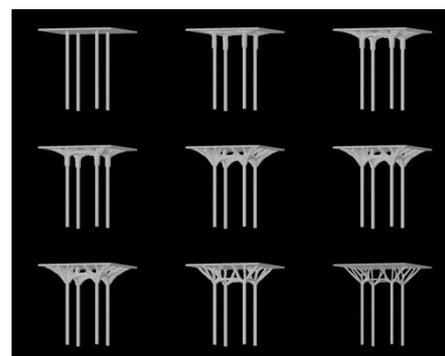


Figure 3.75 Les solutions ESO d'une table se transforme en gravité



Figure 3.76 Arata Isozaki, Qatar National Convention Center, 2013



Figure 3.77 Toyo Ito, Island City Central Park, 2008

Le projet « Qatar National Convention Center » 2011 d'Arata Isozaki (Fig. 3.76) celui de Toyo Ito « Island City Central Park » 2005 (Fig. 3.77) recourent à la méthode d'éléments finis pour optimiser la structure porteuse et en faire un élément emblématique, émergent du processus d'évolution structurelle.

Cet outil d'optimisation largement utilisé par les ingénieurs est-il approprié à l'architecture et quel aspect revêtirait ces émergences produites au cours de la morphogénèse ? (Fig. 3.78)

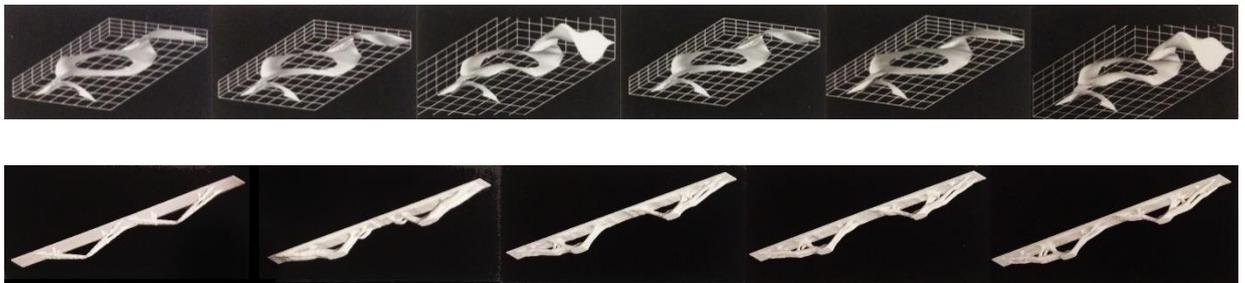


Figure 3.78 Schémas montrant les différentes itérations de l'évolution structurelle

Joris Laarman collabore quant à lui étroitement avec ingénieurs et scientifiques, dans une démarche se situant entre design et sciences naturelles, artisanat et fabrication numérique. Pour Joris Laarman, la forme est liée aux contraintes qui s'exercent sur la matière. Bone Furniture, création de 2006 (Fig. 3.79) se veut la traduction

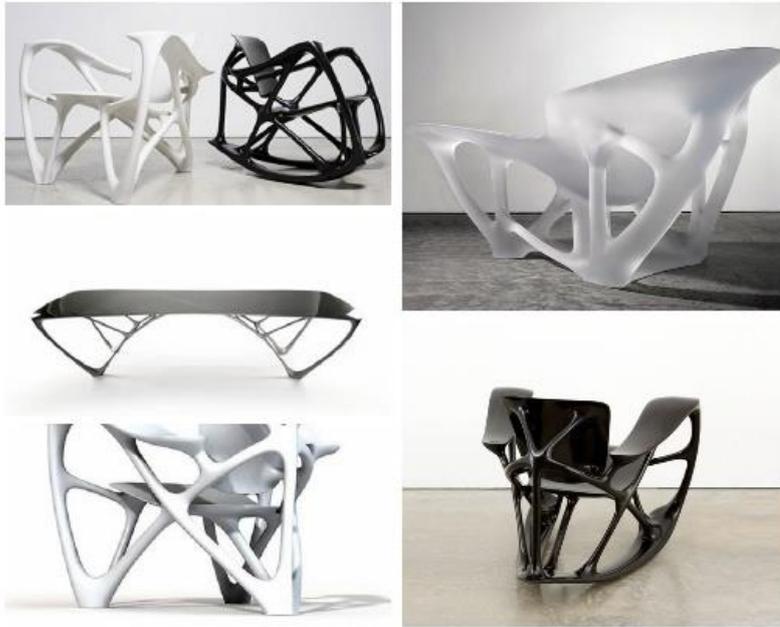


Figure 3.79 Joris Laarman Lab, Bone furniture, 2006

algorithmique des phénomènes de croissance des os. Sa forme découle des contraintes physiques liées au poids, à la stabilité, dans lesquelles la matière est réduite à son minimum, comme pour un os. Laarman utilisait ici « les mêmes processus que ceux des organismes vivants lorsqu'ils se développent, en réaction aux forces de leur environnement », rejoignant par-là d'Arcy Thompson (*On Growth and Form*, 1917).

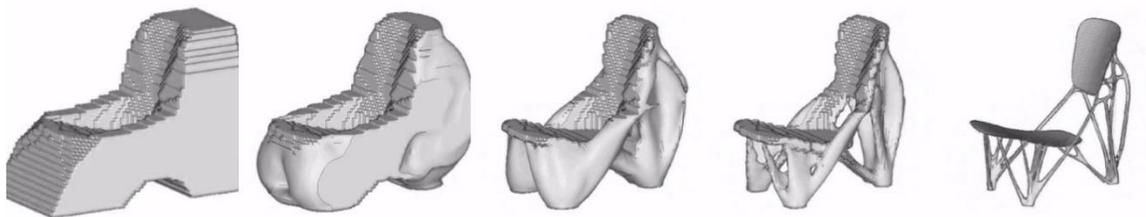


Figure 3.80 Joris Laarman Lab, Quelques étapes de l'évolution structurelle, 2006

Bone Furniture est une gamme de mobilier constituée de sept éléments, dont les sièges Bone Chair et Fauteuil Lounge Chair font aujourd'hui référence. Chaque pièce de la série expérimente un matériau spécifique (aluminium, résine, poudre de marbre, etc.) et différentes finitions. Pour

concevoir et produire Bone Furniture, Joris Laarman a collaboré avec le Centre de développement international Adam Opel GmbH ; celui-ci avait mis au point pour la construction automobile un logiciel inspiré des recherches de Claus Mattheck sur la croissance des os et des végétaux. En transférant cet outil dans le domaine du design et du mobilier, Laarman développe une série d'algorithmes d'optimisation 3D capables de simuler ces processus naturels : certains agents définissent la structure et les lignes principales de l'objet, d'autres en optimisent au maximum la forme, ajoutant ou supprimant de la matière. (Fig. 3.80)

Les objectifs de ces projets sont clairs et rationnels : minimiser la matière de la structure en conservant le maximum de sa résistance structurelle. Mais ces performances ne se rapportent jusqu'à présent qu'à une matière homogène et continue. Qu'en est-il dès lors que les matériaux sont multiples, divers, et donc forcément discontinus et leurs assemblages complexes ?

## 2) Algorithmes génétiques

L'architecte et théoricien Philippe Morel fonde l'agence EZCT Architecture & Design Research en 2000, avec Jelle Feringa et Félix Agid. Son agence interroge l'imbrication des sciences et des technologies dans le domaine de l'architecture. Dans son projet « Chair Model T1-M » en 2004 (Fig. 3.81), l'algorithme génétique avec méthode des éléments finis<sup>82</sup> a été utilisé pour générer une chaise qui a le plus de résistance structurelle et le moins de matière utilisée. 7 séries sont



Figure 3.81 EZCT, Chair Model T1- M, 2004

optimisées par une stratégie à objectif unique, et 2 séries sont optimisées par une stratégie à plusieurs objectifs. Les premières séries ne prennent en compte qu'une seule charge verticale, les secondes prennent en compte plusieurs charges appliquées sur la chaise. La Fig. 3.82 présente une partie de 860 générations (86000 structures différentes).



Figure 3.82 EZCT, Des différentes générations créées pendant le calcul, 2004

Nate Holland de l'université de Nebraska Lincoln (USA) applique directement l'algorithme génétique à l'architecture. Son projet (Fig. 3.83), à recours à Galapagos (logiciel permettant de créer des modèles à partir d'algorithme génétique), il définit certaines règles relatives à la vue, à l'accessibilité, au coût, etc, et demande à l'algorithme génétique de générer un projet.

## 82. Méthode des éléments finis

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physique (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.)



Figure 3.83 Projet de Nate Holland, 2011

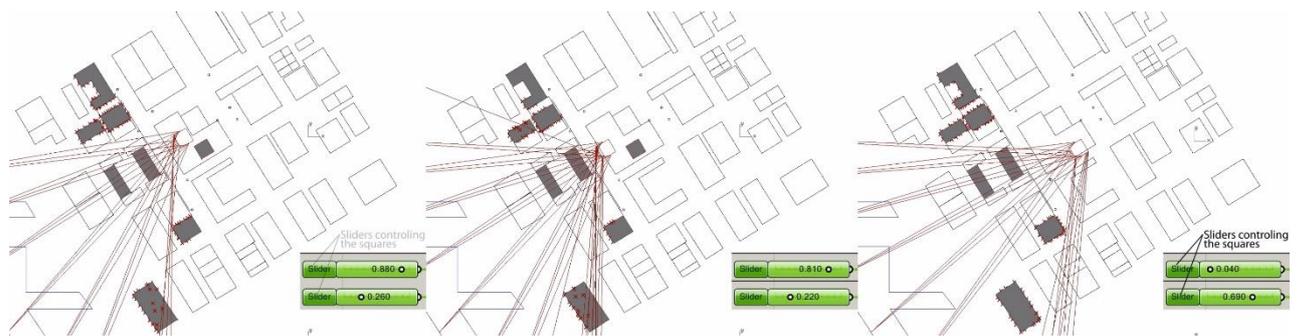


Figure 3.84 Nate Holland, *Processus de calcul pour avoir des vues les plus dégagées*, 2011

Ce projet a été conçu selon deux processus bien distincts répondant chacun de règles propres. Le premier concerne la modélisation du volume de la tour générée étage par étage. Chaque étage est composé par une série de rectangles. L'algorithme génétique est appliqué sur ces rectangles pour optimiser l'exposition et offrir les vues les plus dégagées. (Fig. 3.84)

Le second processus s'applique à la génération des plans de chaque étage. L'auteur n'a pas précisé la règle de calcul utilisée, mais au travers des schémas présentés, on présume que la question des surfaces minimales et maximales de chaque appartement comme celle de ses proportions sont prises en compte (Fig.3.85).

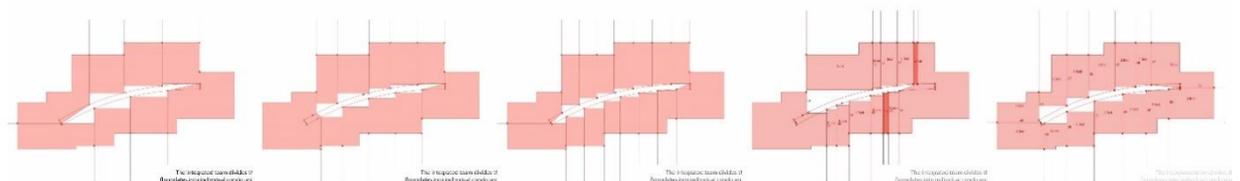


Figure 3.85 Nate Holland, *Processus de calcul pour la sous-division de chaque niveau*, 2011

Le projet Breed, 2010, (Fig. 3.86) réalisé par deux artistes Erwin Driessens et Maria Verstappen est un projet de

recherche sur la génération de la forme à partir de l'algorithme génétique. A la différence toutefois des algorithmes précédents, celui-ci se fonde sur deux processus : la division cellulaire et l'évolution génétique.

Le processus de génération est assez complexe. Une cellule originale (Fig. 3.87) se divise en 8 cellules plus petites, ces 8 cellules de 2ème génération peuvent être divisées encore en 64 cellules... (Cf. Chapitre 3.1.1). A chaque itération, tout comme dans l'évolution des automates cellulaires, certaines de ces cellules disparaîtront. Cette similarité avec la logique

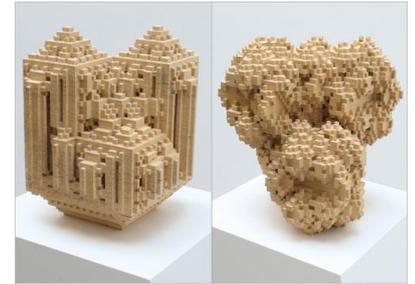


Figure 3.86 Driessens & Verstappen, *Breed*, 2010

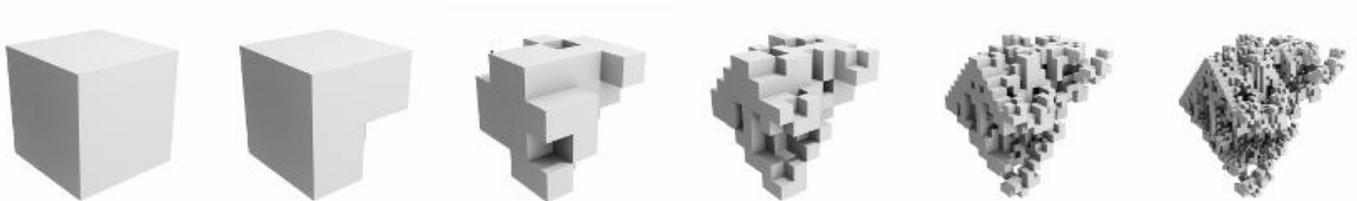


Figure 3.87 Driessens & Verstappen, *Quelques itérations de Breed*, 2010

des automates cellulaires où l'ensemble des cellules avoisinantes décide de la conservation ou de l'élimination de certaines d'entre elles ne doit dissimuler que ce résultat est le fait de la sélection effectuée par l'algorithme génétique, qui cherche toutes les possibilités de composition des cellules afin d'aboutir à une structure auto portante.

La différence essentielle de ce projet est qu'ici les génomes ne sont plus des données inapparentes, mais sont bien visibles par la position des cellules elles-mêmes.

Par contre, la complexité de ces processus aboutit à une forme finale dominée par une forte auto similarité.

Les processus générés et optimisés des algorithmes évolutionnistes recèlent des capacités certaines à produire des formes émergentes c'est-à-dire à engendrer des figures non programmées, imprévisibles.

### 3.1.5 Système multi-agents

#### A. Introduction

L'origine des systèmes multi-agents vient de l'IAD (Intelligence artificielle distribuée). Dans la science informatique, un système multi-agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situé dans un même environnement et interférant selon des relations déterminées. Il parvient à la résolution d'un problème en le divisant en plusieurs séquences de scripts, chaque agent dispose d'un caractère indépendant et de sa propre stratégie pour résoudre le problème. Ces agents sont réunis pour aboutir à une stratégie qui ne pourrait être réalisée par un agent seul.<sup>83</sup>

On appelle système multi-agent (SMA), un système composé des éléments suivants :<sup>84</sup>

1. Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
3. Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.

*83. En intelligence artificielle, un agent intelligent (AI) est une entité autonome capable percevoir son environnement grâce à des capteurs et aussi d'agir sur celui-ci via des effecteurs afin de réaliser des buts. Un agent intelligent peut également apprendre ou utiliser des connaissances pour pouvoir réaliser ses objectifs.*

*84. Jacques Ferber, Les Système Multi-agents, vers une intelligence collective, Paris, InterEditions, 1995, p. 14*

6. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers.

La définition d'« agent intelligent » n'est pas claire, souvent réduite à l'autonomie de l'agent. Comme l'aspirateur robotisé qui entame automatiquement sa tâche après l'ordre donné par l'être humain. Une autre explication est que, dans la pratique, tous les agents intelligents travaillent sous la surveillance de l'humain. C'est-à-dire que l'autonomie totale d'un SMA est très rarement réalisée aujourd'hui : humain et SMA collaborent pour conduire la résolution à son terme. Par contre, si l'on considère un humain comme un « agent intelligent », les activités sociales humaines peuvent être aussi considérées comme un exemple de SMA. Un des principaux caractères du SMA est l'«auto organisation», même si la logique de comportement de chaque agent demeure à ce jour rudimentaire, le système peut générer au niveau global des phénomènes d'auto organisation. Le comportement des agents dans l'«auto organisation» a souvent tendance à trouver la résolution d'un problème sans être trop influencé par des facteurs extérieurs.

L'application du SMA dans l'architecture demande à ce que l'architecte change son point de vue sur les éléments architecturaux pour les considérer comme des éléments intelligents qui peuvent interagir et construire le bâtiment de façon autonome.

Principales caractéristiques du SMA:

- autonomie, les agents sont au moins partiellement indépendants, conscients de soi, autonomes ;

- vue locale, aucun agent n'a une vue globale du système, ou plutôt le système est souvent trop complexe pour qu'il puisse être compris par les agents ;
- décentralisation, il n'y a pas un agent supérieur aux autres, en position dominante qui pourrait exercer un contrôle sur les autres, sinon, le système deviendrait un système monolithique, réduisant les interactions des agents.

La méthode de modélisation utilisant le SMA s'appelle « Multi-Agent Based Modeling » (Modélisation multi-agents), le modèle crée s'appelle « Modèle multi-agents ». La plupart des recherches sur le SMA existent en physique de particules (agent= particule élémentaire), en chimie (agent= molécule), en robotique (agent= robot), en biologie cellulaire (agent= cellule), en éthologie (agent = animal), en sociologie et en ethnologie (agent= être humain).

Les sujets, les notions, les questions que le SMA rencontre et est amené à traiter :

- croyance, désir, intention;
- coordination;
- organisation;
- résolution distribuée de problèmes (RDP en anglais DPS pour Distributed Problem Solving);
- apprentissage multi-agents;
- communauté scientifique;
- fiabilité et tolérance aux fautes.

Du fait de l'interaction constante des agents, le processus est en perpétuelle évolution, toujours en mouvement, ce qui n'empêche pas des états stables. Ce processus de génération de nouveaux caractères s'appelle « émergence », créant un système plus complexe que la simple addition d'agents. C'est aussi une des qualités premières des systèmes non-linéaires.

Deux exemples simples pour mieux comprendre le SMA.

Le système multi-agents est à présent un des domaines les plus étudiés par les architectes qui regroupe toutefois des projets très différents tant par l'usage qui en fait en tant qu'outil que par ce qu'il permet en tant que système non linéaire, ouvert. En général, ce système offre la possibilité de générer des motifs inédits en 2 et 3D.

Parmi les plus étranges et fascinants phénomènes que la nature offre comme émergence de comportements d'agents en interaction, se trouvent les nuées d'oiseaux en vol (Fig. 3.88), les essaims d'insectes, les bancs de poissons (Fig. 3.89), et plus complexe encore, les colonies des fourmies (Fig. 3.90). Les scientifiques depuis longtemps se sont penchés sur ces mécanismes pour en comprendre les phénomènes et parvenir à les modéliser. Un des premiers programmes de vie artificielle est « Boids » développé par Craig W. Reynolds en 1986, simulant le comportement d'une nuée d'oiseaux en vol. Le mot boid est par ailleurs une contraction de bird-oid (qui a la forme d'un oiseau). Le programme Boids permet de modéliser un comportement émergent. En effet, la complexité comportementale résulte ici de l'interaction d'agents individuels respectant un nombre limité de règles simples, telles que :

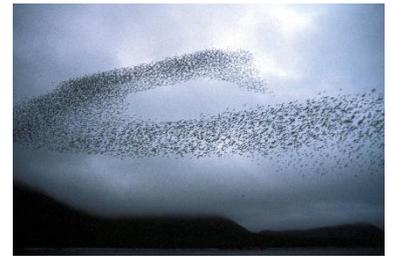


Figure 3.88 Flocage des oiseaux



Figure 3.89 Bancs de poissons

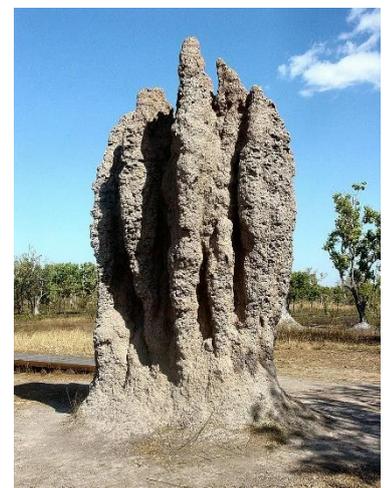


Figure 3.90 Colonie des fourmies

- la cohésion, pour former un groupe, les boids se rapprochent les uns des autres ;
- la séparation, 2 boids ne peuvent pas se trouver au même endroit au même moment ;
- l'alignement, pour rester groupés, les boids essaient de suivre un même chemin.

Dans les faits, cela se traduit par la réaction du boid à son voisinage. Celui-ci se divise en trois zones, de la plus proche à la plus éloignée : une zone de répulsion, une zone d'orientation et une zone d'attraction. Lorsqu'un voisin entre dans la zone de répulsion, le boid s'en éloigne, s'il est dans la zone d'orientation, le boid le suit, et s'il est dans la zone d'attraction, il s'en rapproche. Généralement, on ajoute également à la simulation un angle mort, dans lequel le boid ne peut pas percevoir ses voisins. En faisant varier les rayons des différentes zones les uns par rapport aux autres, on peut voir émerger différentes structures, qui ont des fortes ressemblances avec ce qui est observable dans la nature.

## B. Catégories et projets

### 1) Modèle basé sur un seul script exposé tout seul

#### 1.a) Application en 2D

Les premières recherches du SMA ont commencé par l'utilisation 2D.

Comme une variante de « boids », Casey Rea, à travers une série de 15 projets appelés « processing » explore, entre 2004 et 2010, l'émergence de nouveaux motifs en établissant une série de règles régissant le comportement d'agents indépendants. S'appuyant sur ces expérimentations, Casey Reas va développer le logiciel « processing », largement utilisé pour toutes les recherches algorithmiques dans l'architecture.



Figure 3.91a Casey Reas, Processing 4, 2005

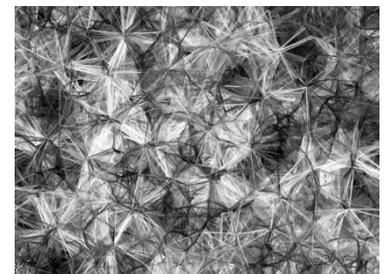


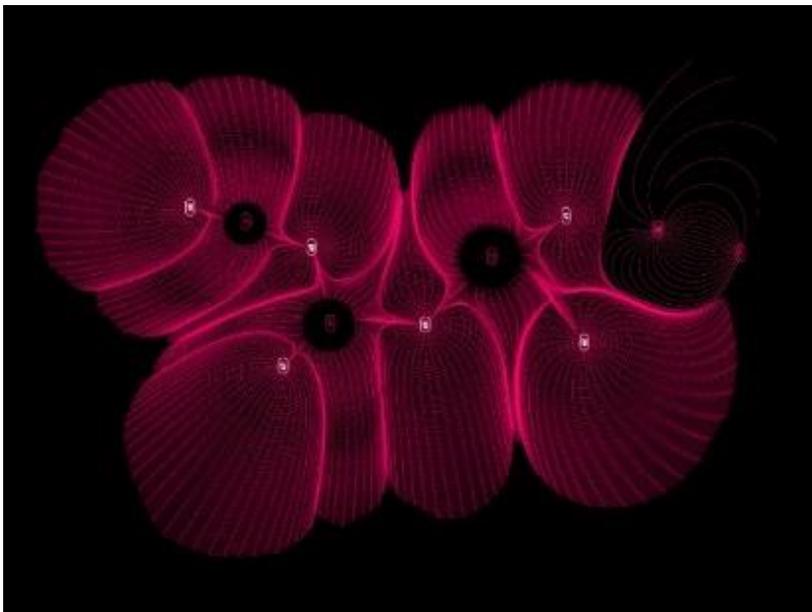
Figure 3.92b Casey Reas, Une autre variante générée par Processing 4, 2005

Dans « Process 4 » en 2005 (Fig. 3.91a, b), par exemple, Casey Reas prescrit une série d'agents aux comportements définis comme suit :

- règle « B1 », se déplacer sur une ligne droite ;

- règle « B2 », se contraindre dans la surface ;
- règle « B3 », changer de direction au contact d'un autre agent ;
- règle « B4 », s'éloigner de l'agent touché.

Ces règles de comportements n'ont pas forcément de sens ou objectifs clairs comme celles dans « Boids », mais grâce à leur caractère d'auto-organisation, elles parviennent à créer des motifs surprenants. Une même règle de base, un même script de départ peuvent générer des projets très différents. Par exemple, Alisa Andrasek de Biothing a mis au point le script EMF (Electro-Magnetic Fields) (Fig. 3.92) simulant un champ magnétique. A partir d'une série de point (distributeur), les lignes représentant le champ magnétique varient selon la distance entre ces points.



*Figure 3.92 Biothing, Motif généré par EMF, Seroussi Pavillion, 2007*

Par la suite « Orbita series » en 2006, de Biothing (Fig.3.93), et « Grid » de Mariuz Watz en 2012, (Fig. 3.94) sont deux projets développés à partir du même prototype, les résultats en sont bien dissemblables.

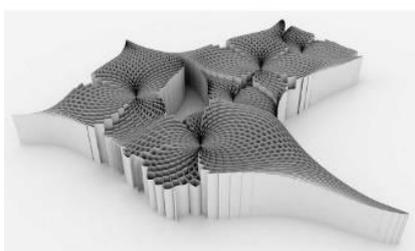


Figure 3.93 Biothing, Orbita series, 2006

Figure 3.94 Mariuz Watz, Grid, 2008-2012

L'utilisation du système multi-agents en 2D, sans doute de par la simplicité des règles, les motifs générés aboutissent toujours à une autosimilarité. Même s'ils sont générés par des règles complètement différentes, il est difficile de parvenir à des formes hétérogènes, à une complexité supérieure au système primaire.

### 1.b) Application en 3D

Les applications 3D du SMA approchent des phénomènes plus complexes. Jenny Sabin, dans « Polymorph : Digital Ceramics » 2009-2013 (Fig. 3.95), reconsidère le potentiel architectural de la technique traditionnelle de la céramique. « PolyMorph » prolonge le travail entamé par Sabin dans le cadre de son séminaire Digital Ceramics (2008-2010), qui explorait les propriétés matérielles de l'argile à la croisée de

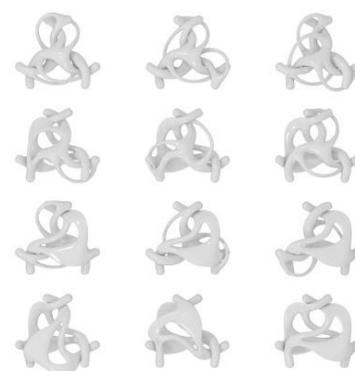


Figure 3.95 Jenny Sabin, Polymorph: Digital Ceramics, 2009-2013

l'artisanat et des techniques de fabrication numérique. Cette nouvelle étape cherche à définir des processus de génération de formes, où géométrie et matérialité se trouvent intrinsèquement liées. Le réseau de connexions de PolyMorphe résulte de l'étude de comportements cellulaires, traduits par des opérations récursives. *La structure de l'installation – à laquelle la plasticité de l'argile confère un aspect fortement ornemental – introduit une nouvelle relation de la partie au tout, brisant les hiérarchies traditionnelles et redéfinissant de fait une nouvelle tectonique.*



Figure 3.96a Dağhan Çam, *Endemic Interstices*, 2011

« Endemic Interstices » (Fig. 3.96a,b) de Daghan Cam est un projet de recherche qui explore la possibilité d'une architecture prototypique capable de s'auto-organiser tout en s'adaptant à son environnement par l'exploitation des ressources naturelles. Le projet s'inspire de la physique des processus géomorphologiques - telles que fissures, anfractuosités, cavités, et toutes sortes de reliefs pouvant abriter un logis-, pour par le calcul en modéliser les formes



Figure 3.96b Dağhan Çam, *Prototype de projet*, 2011

complexes issues de ces déformations et craquements de la terre. La structure créée est calquée sur les vides et béances des fissures et est réalisée à partir d'un coffrage négatif où ce qui est creux devient plein. Cette variété de motifs dus à la fissuration de l'argile est explorée doublement dans un processus d'aller-retour à travers des expériences physiques et des simulations numériques afin de tester les différentes qualités performatives des structures comme la stabilité et la porosité. Ici l'architecture ne commence pas avec l'emploi de matériaux fixes mais par des simulations visant à explorer le comportement, la plasticité et les déformations de ces matériaux sous l'effet de certaines contraintes.

TEDGLOBAL 2012



Figure 3.97a Sjet, Biomolecular Self-assembly, 2012

En 2012, Skylar Tibbits et Arthur Olson exposent Biomolecular Self-assembly dans le cadre de la conférence TEDGlobal à Edimbourg (Could buildings one day build themselves?) (Fig. 3.97 a,b). Arthur Olson, professeur de biologie moléculaire au sein du prestigieux centre de recherche Scripps (Californie) est considéré comme un pionnier dans l'analyse et la visualisation des assemblages biologiques allant de l'atome à la cellule. Ce projet fait la démonstration physique du phénomène d'auto organisation à travers des vibrations transmises à des pièces métalliques.



Figure 3.97b Sjet, Biomolecular Self-assembly, 2012

Placées dans un flacon de verre, ces dernières, agitées pendant un temps indéterminé, s'auto-assemblent en une configuration programmée. Les formes de base de ces pièces reprennent certaines configurations structurelles de particules comme celle du virus de la mosaïque du tabac, celle de l'enzyme métalloprotéine ou encore celle de la protéine ferritine. La seule énergie des secousses infligées à ces pièces les configure en un assemblage identique aux structures biologiques.

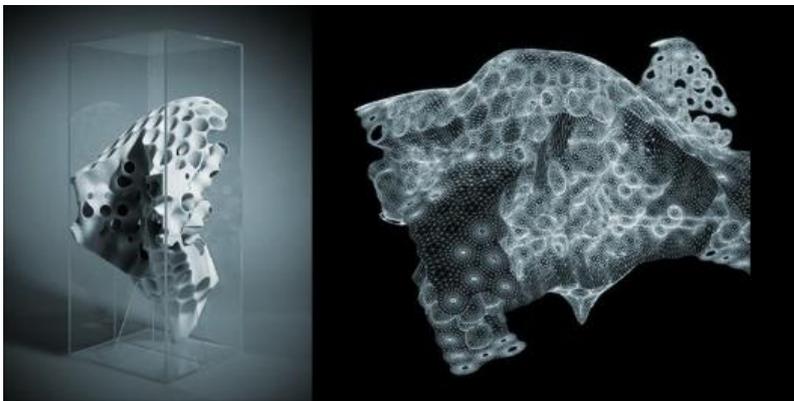


Figure 3.98a Supermanoeuvre, Living Morphologies, 2008

Le projet « Living Morphologies » de l'agence Supermanoeuvre (Fig. 3.98 a, b) par la méthode de rétroconception, ou ingénierie inversée prend comme objet l'Unité d'habitation de le Corbusier pour en déterminer le fonctionnement interne. Les typologies de cette dernière sont traduites dans un script de manière à faire émerger les potentiels opérationnels de leurs règles sous-jacentes.

*« Les morphologies habitables explorent le potentiel des méthodes de design comportemental telles que les traduisent les algorithmes pour générer de nouvelles typologies de logements à haute densité et des formes connectées à la ville.*

*La seconde piste de recherche en design réexamine activement le potentiel générateur de typologies via la rétro-*

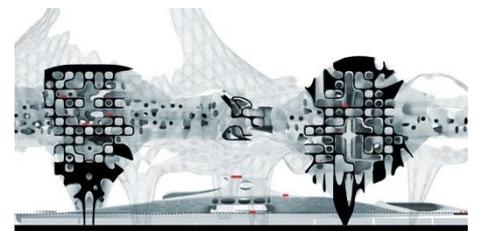


Figure 3.98b Supermanoeuvre, Coupe de projet, 2008

*ingénierie et l'encodage postérieur des logiques de planification spatiale et de circulation telles qu'elles existent à l'état de modèle dans l'Unité d'Habitation de Le Corbusier. En codant ces logiques par le biais de l'algorithme, le potentiel opérationnel des ensembles de règles sous-jacentes peut être plus explicitement défini, ajusté et évoluer. En augmentant le comportement interne et sensible au contexte de ces systèmes pré-architecturaux, leur puissance est intensifiée et permet des résultats diversifiés tout en conservant les données initiales du projet corbuséen : hiérarchies circulatoires hautement efficaces, stratégies de ventilation transversale, impact de lumière du jour qui ont fait la réputation du projet. »*

Il s'agit par le biais de cette méthode d'ingénierie inversée d'analyser et simuler le comportement des habitants au sein des cellules d'habitation et de les matérialiser grâce au système multi-agents. Le mouvement des habitants – devenus, dans le processus de modélisation des agents – amorce le projet de conception et fournit les protocoles qui vont servir à l'algorithme pour générer les formes complexes. Ce processus se pose à rebours de la méthode de projection qui a longtemps prévalu où le plan revêtait une valeur ordinale guidant et organisant la partition des espaces.

Ce qui est visé dans l'Unité d'habitation, dans sa valeur paradigmatique, « archétypale » de l'architecture moderne, de la réussite de l'habitat dense- ce ne sont pas des formes à imiter, une typologie à copier mais sa capacité à créer du bien vivre : « La maison est un outil à demeurer » aimait à dire Le Corbusier.

## 2) Modèle basé sur un seul script inséré dans un autre objet

Il arrive que des modèles créés par un MAS soient insérés dans un objet existant, la greffe opère immédiatement un effet de contraste.

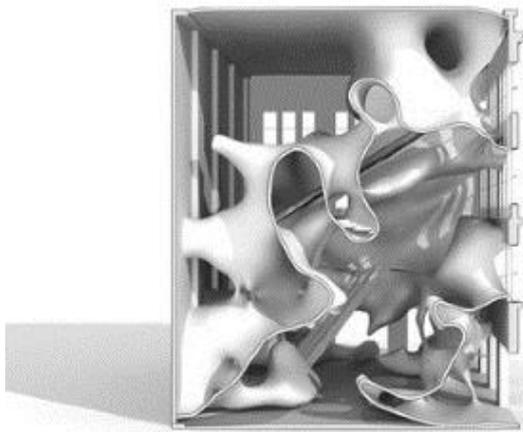


Figure 3.99a Kokkugia, LT COLLINS ST BATHS, 2004

Le projet « LT COLLINS ST BATHS » de 2004 (Fig. 3.99a, b), du laboratoire expérimental Kokkugia créé par Roland Snooks et Robert Stuart-Smith, s'attache à valoriser la porosité d'une topologie complexe.

Cette opération a été réalisée à l'intérieur de l'enveloppe d'un bâtiment existant. L'espace existant est considéré comme une structure morphologique à fort potentiel



Figure 3.99b Kokkugia, LT COLLINS ST BATHS, 2004



Figure 3.100a Supermanoeuvre, Trabeculae, 2008

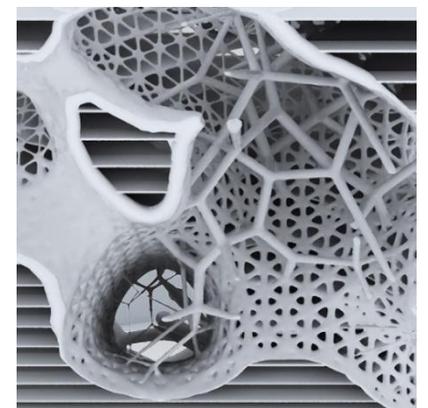


Figure 3.100b Supermanoeuvre, Trabeculae, 2008

investie par des particules s'auto organisant. Ces particules sont ensuite reliées entre elles par la technique de tomographie « isosurfacing ». Les formes autogénérées interviennent directement sur la structure existante sans le recours de schémas d'organisation préalables ou de diagrammes génératifs.

Les projets Proto-synthesis et Trabeculae, 2008, (Fig. 3.100 a,b) de Supermanoeuvre illustrent, respectivement, les aspects génotypiques et phénotypiques du principe de conception en cours à l'agence.

Proto-synthesis (le génotype) n'est ni un objet de design ni un artéfact, mais une stratégie algorithmique d'élaboration d'une architecture topologiquement riche et hautement complexe. Il est également le génome du cadre opératif pour le futur projet architectonique Trabeculae (travée osseuse). Seulement pour le cas présent, sa photosynthèse n'a pas été codifiée selon des protocoles programmatiques spécifiques afin de générer des effets programmatiques spécifiques et pour cela, le projet se trouve topologiquement libre et capable de nombreuses possibilités. Dans le système, la construction de l'architecture, position, échelle, déplacement, densité, épaisseur, longueur, etc., se réalisent au travers d'algorithmes et se simulent au moyen de logiques internes, prise d'échantillons discrets et rétro alimentation des stimulations dans l'environnement local. Trabeculae (le phénotype) est une mise en scène des algorithmes de photosynthèse dans le but de reconfigurer le patio central d'une tour standard de bureaux. L'extrusion des plateaux se fait par un système de branches héliotropiques privilégiant l'accès à la lumière du jour de ces zones centrales. Le patio ainsi configuré par le biais d'une arborescence complexe

dispose quelque soit les plateaux de la tour des meilleures conditions d'éclairément.

Un deuxième ordre de prolifération du même système est appliqué, mais à une échelle plus réduite afin de créer la membrane réticulaire enveloppant le volume du patio.

La stratégie d'insérer un modèle de SMA dans un objet existant produit un contraste important entre la forme issue du SMA et le volume bâti existant mais cela en fait-il pour autant de l'architecture ? La constructibilité et l'habitabilité de cette structure en dépit des propos de son concepteur sont difficilement perceptibles, tout se passe comme si le bâtiment existant pourtant bien banal demeurerait lui seul le garant de ces deux conditions essentielles de l'architecture.

### 3) Modèle basé sur plusieurs scripts

Les systèmes basés sur des scripts uniques produisent souvent des formes homogènes, pour y remédier et apporter diversité et complexité, les architectes optent pour en employer plusieurs simultanément en les superposant.

Les projets de Biothing : « Orbita Series », « Mesonic

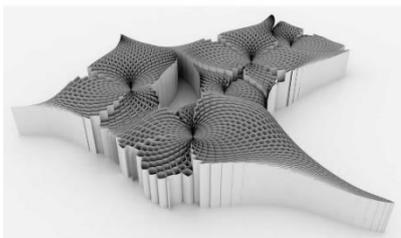


Figure 3.101 Biothing, Orbita Series, 2006



Figure 3.102 Biothing, Mesonic Fabrics, 2007-2009

Fabrics » et « Phosphorescence » créés successivement en 2006, 2007-09 et 2010, procèdent tous les trois du même algorithme élaboré par Alisa Andrasek, EMF (qui simule et visualise le champ magnétique par des courbes). Dans « Orbita Series », une règle très simple d'extrusion en verticale a été superposée au modèle ; le motif original du champ magnétique a tout simplement été élevé en hauteur.

Mais, un an plus tard, pour « Mesonic Fabric » une série de règles de génération plus complexe est mise en œuvre. La couverture formée au départ par EMF selon les mêmes principes de simulation de champ magnétique, est soulevée



*Figure 3.103a Biothing, Phosphorescence, 2010*

en son centre donnant à l'espace configuré de la sorte l'aspect d'une nef. Cette seconde règle organise les hauteurs de chaque partie de la structure selon leur distance par rapport au centre, à la colonne vertébrale de la structure, considérée par ses auteurs comme le centre d'émission du champ magnétique et plus cette distance est proche de celui-ci plus la hauteur est importante. On se souvient si on se reporte au § 3.1.3 sur les automates cellulaires que le sol est fabriqué selon ce système et que son relief strié selon des hauteurs variables procède lui aussi selon une règle toute autre. Au final « Mesonic Fabric » condense un ensemble de



*Figure 3.103b Biothing, Phosphorescence, 2010*

règles opératoires hétérogènes les unes par rapport aux autres.

Le projet pour le concours du centre de musique de Taiwan, « Phosphorescence » (Fig. 3.103 a,b), s'applique à mettre en pratique les résultats obtenus dans les expérimentations précédentes de 2006 et 2007-09. La structure principale est toujours générée par EMF, par contre, au lieu de les représenter par des lignes auxquelles est donnée une épaisseur, Alisa Andrasek introduit une règle qui simule le mouvement brownien pour transformer le modèle filaire emprunté aux lignes de force du champ magnétique en une coque dont les composants sont rythmés de manière stochastique.

La superposition de plusieurs scripts offre des possibilités de faire varier le modèle avec une grande liberté. Comparés aux objets fractals, ces prototypes sont bien plus flexibles. Leurs densités, hauteurs, détails sont modulables.

Le projet « Archigram Revisited » est un projet de Minimaforms, invité par David Greene un des fondateurs d'Archigram, afin de repenser et développer les projets « Living Pod » (Fig. 104) et « High-Rise Tower » (Fig. 105) d'Archigram à partir du système multi-agent.

Minimaforms reprend l'idée de « plug-in » d'Archigram. Les capsules « Living Pod » sont alors considérées comme des agents dotés d'une intelligence artificielle capable de créer un système auto-poétique.

Système qui peut se décrire comme suit:



Figure 3.104 Archigram, Living Pod, 1966

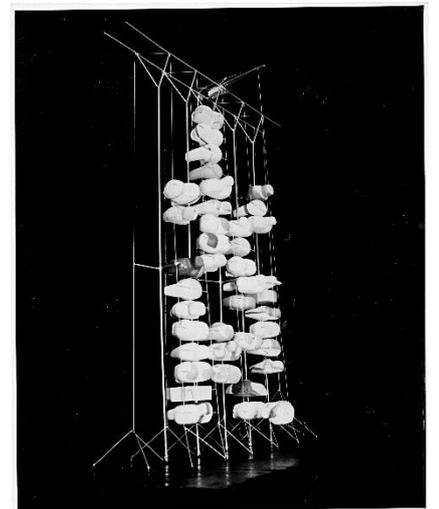
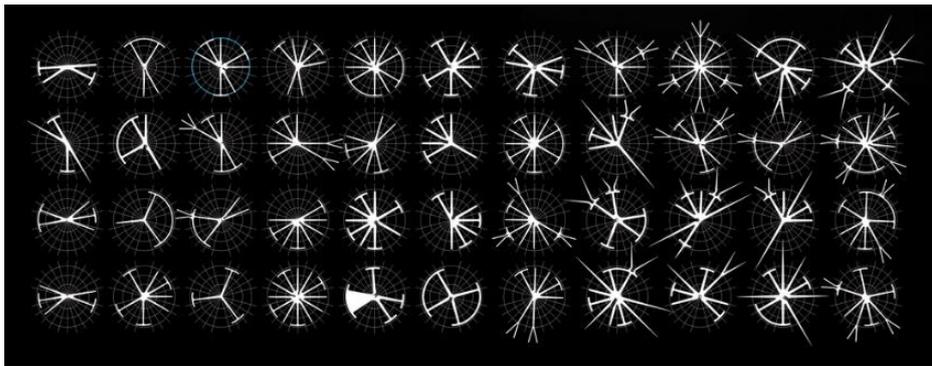


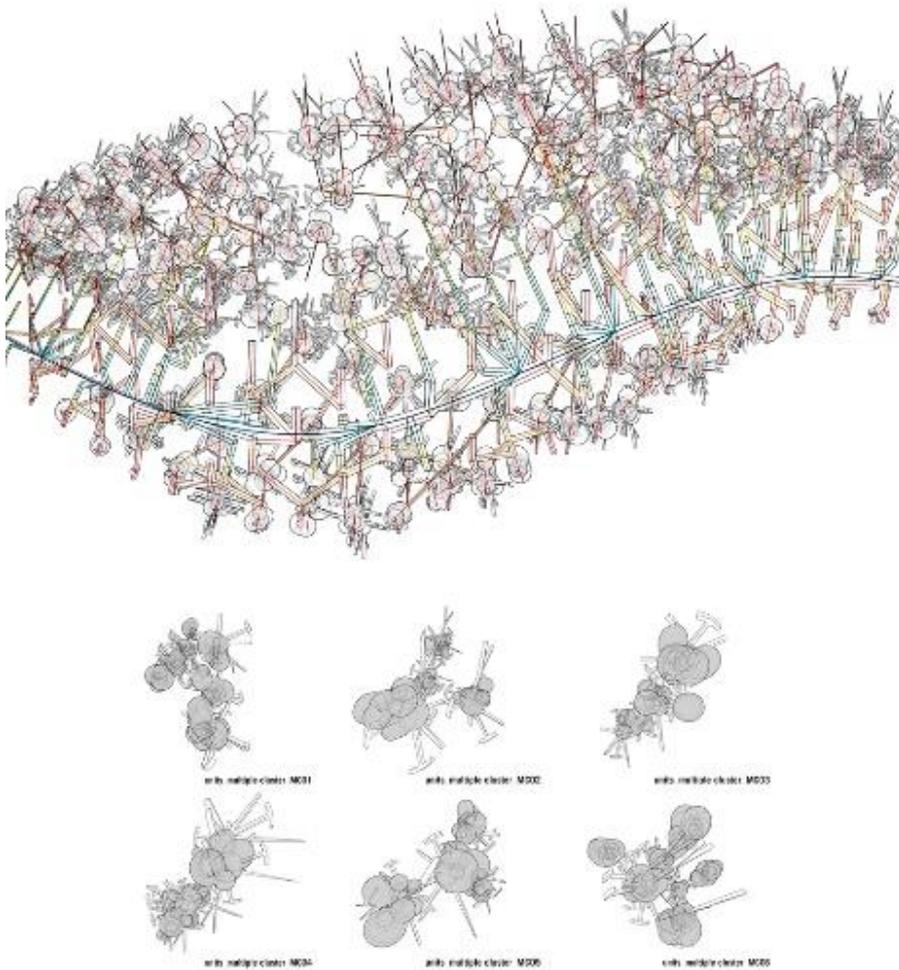
Figure 3.105 David Greene, Living Pod Tower, 2008

- les agents développent chacun plusieurs « spicules » structurels créant une structure complexe par le biais des interconnexions qu'ils tissent (Fig. 3.106) ;
- les agents développent également des queues dont la mise au point fournira un système de circulation ;



*Figure 3.106 Minimaforms, structures générées par des agents avec des spicules et queues, 2008*

- dimensionné selon la densité de la population des agents, permettant notamment l'accès aux capsules (Fig. 3.107) ;
- les corrélations et interconnexions entre agents ou capsules évoluent de manière autonome.



*Figure 3.107 Minimaforms, la structure générée par des agents intelligents, 2008*

La chose remarquable de ce projet ne tient pas tant au modèle généré par ces trois phases mais la maquette construite manuellement censée représenter ce dernier. En comparant l'un et l'autre (Fig. 3.108a, b), le modèle comporte tous les défauts mentionnés avant : homogénéité, autosimilarité, absence de qualité constructive. A l'inverse, la maquette présente une réelle complexité : les pods d'habitation, les membranes diaphanes, les maillages ajoutés viennent se mélanger et s'imbriquer au modèle original. Le travail en maquette par les écarts, les accidents qu'il crée dans le projet s'avère d'une grande richesse architecturale.



Figure 3.108a *Minimaforms*, image rendu de la structure générée, 2008



Figure 3.109b *Minimaforms*, photo de la maquette, 2008

Isaie Bloch convoque les champs de l'architecture, du design, de la mode et des arts plastiques dans sa recherche d'une « nouvelle condition hybride ».

La console Smudge illustre la subversion des logiques de production numérique entreprise par Bloch, qui développe des processus de conception hautement tolérants à l'erreur, conjuguant fabrication semi automatisée et pratique



Figure 3.110 *Eragatory*, La Console Smudge, 2012

artisanale afin de se soustraire à la systémativité des scripts et éviter de la sorte les effets d'autosimilarité. Bloch conçoit un objet hybride où une géométrie fibreuse et texturée surgit entre les surfaces lisses et continues pour générer des espaces différenciés. Peau, structure et volumes, bien que matériellement hétérogènes, se combinent ici en un tout



*Figure 3.111a Isaie Bloch + Gilles Restin, the homemade dessert & Liepaja city council competition, 2013*



*Figure 3.111b Isaie Bloch + Gilles Restin, the homemade dessert & Liepaja city council competition, 2013*

dont la complexité émerge des interactions des agents.

Bloch poursuit sa réflexion sur l'objet hybride, dans le concours « the homemade dessert & Liepaja city council competition » (Fig 3.111a, b). La maquette qu'il élabore mélange un maillage de fils bronze et des strates de béton. Chaque élément obéit à son propre système et s'articule à l'autre sporadiquement, le résultat aboutit à un objet d'une plasticité forte et riche.

### 3.1.6 Intelligence collective

#### A. Introduction

*« Qu'est-ce que l'intelligence collective ? C'est une intelligence partout distribuée, sans cesse valorisée, coordonnée en temps réel, qui aboutit à une mobilisation effective des compétences. »*

*Pierre LEVY, L'intelligence collective : pour une anthropologie du cyberspace, La Découverte/Poche, 1997*

Quatre postulats la caractérisent et :

- une information locale et limitée ; l'individu ne dispose que d'une connaissance limitée de son environnement et n'a pas conscience de la totalité des éléments qui influencent le groupe ;
- des règles simples ; chaque individu obéissant à un ensemble de principes élémentaires par rapport au comportement du système global ;
- des interactions sociales multiples ; chaque individu étant en relation avec un ou plusieurs autres individus du groupe ;
- une structure émergente utile à la collectivité ; chaque individu trouvant un bénéfice à collaborer (parfois instinctivement) et sa propre performance au sein du groupe se révélant meilleure que s'il demeurait isolé.

Fondamentalement, le système multi-agents vu précédemment peut être considéré comme de l'intelligence collective. Mais la raison de proposer une nouvelle famille tient à ce que les « agents » d'intelligence collective utilisés

ici sont des humains qui ont des intelligences individuelles bien plus développées que les intelligences produites artificiellement. En plus, et grâce à la complexité de cette intelligence, quand un groupe de personnes collabore sur la même plateforme, des questions comme la prise de décision rationnelle, le comportement intentionnel, la mentalité du troupeau, la criticité d'auto-organisation etc. rendent les résultats imprévisibles ; de telles expérimentations toujours plus proches de l'intelligence humaine pouvant modifier le rôle d'architecte dans le futur.

## B. Projets

Le projet ci-après développe un niveau d'intelligence élevé bien supérieur aux projets conçus au travers du système

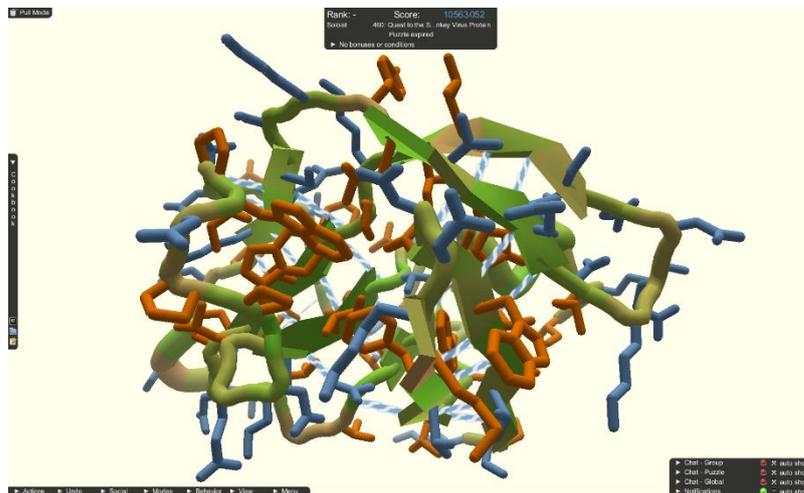


Figure 3.112 Foldit, la meilleure solution trouvée à présent pour Mason pfizer monkey virus, 2008

multi-agents.

Foldit (Fig. 3.112) est un jeu vidéo expérimental sur le repliement des protéines, développé en collaboration entre

le département d'informatique et de biochimie de l'université de Washington. Le processus par lequel les êtres vivants créent la structure primaire des protéines, la synthèse des protéines, est assez bien compris. Cependant, déterminer comment la structure primaire d'une protéine se transforme en une structure tridimensionnelle, c'est-à-dire comment la molécule se « plie » est plus difficile. Un processus général connu donc, mais la prédiction des structures protéiques s'avère un calcul compliqué. Foldit tente d'utiliser les capacités naturelles du cerveau humain pour résoudre ces problèmes. (Fig. 3.113)

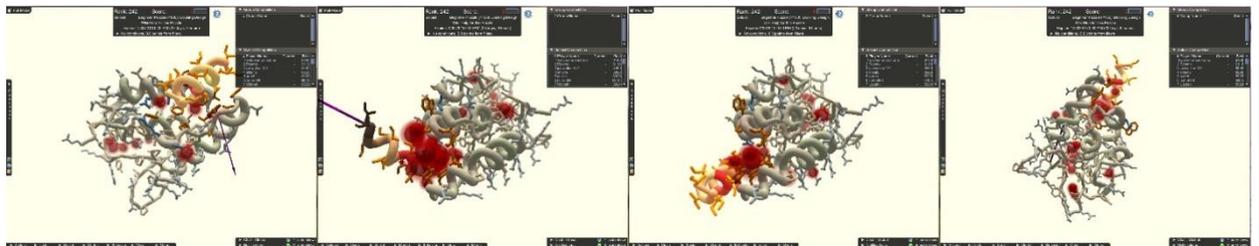


Figure 3.113 Les manipulations sur des composants d'une protéine, 2008

Les protéines sont des éléments essentiels de la vie de la cellule : elles peuvent jouer un rôle structurel (comme l'actine), un rôle dans la mobilité (comme la myosine), un rôle catalytique (les enzymes), un rôle de régulation de la compaction de l'ADN (les histones) ou d'expression des gènes (les facteurs de transcription), etc. En somme, l'immense majorité des fonctions cellulaires est assurée par des protéines.

Les différentes fonctions de protéines sont spécifiées par ses structures différentes. Une protéine est une macromolécule biologique composée d'une ou plusieurs chaînes d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques (chaîne polypeptidique). En changeant la combinaison et la structure, on peut obtenir des protéines qui aident à guérir des



des ressources comme l'argent, le capital social, le recyclage des déchets (Fig. 3.115) ; partant de là, il attend en retour des idées pour les villes du futur.

Le projet en est encore qu'à ses débuts, la mise en ligne est un processus de longue durée, sa publication finale étant prévue la fin de l'année 2015. La vidéo n'offre à présent que des vues éclatées d'immeubles, ce qui autorise à considérer que ce n'est pas encore de l'architecture. Mais une fois les espaces rendus habitables, le sera-t-il pour autant. Ce projet n'est-il pas victime de sa fascination pour Fold.it, d'une transposition qui oublie ce qui fait architecture ?

En médecine les objectifs peuvent très clairement être identifiés et explicités, en architecture même si l'idée préexiste, la maturation est lente.

L'intelligence collective bouleverse le processus de conception architectural qui demeure un travail individuel ou en tout cas répondant d'une hiérarchie, d'une autorité dès lors qu'un très grand nombre de personnes peut participer librement à la conception sans vraiment de coordination. Les jeux vidéo en ligne invitent à de telles pratiques où chacun selon ses propres impulsions, spontanément, apporte « sa pierre à l'édifice ».

C'est une orientation ambitieuse mais en même temps très risquée, il conviendra à cet égard d'évaluer l'incidence de sujets aussi sensibles que la criticité d'auto organisation, le comportement irrationnel, ainsi que celle des questions émanant de la théorie des jeux comme la prise de décision rationnelle, la coopération vs la compétition, le dilemme du prisonnier au risque de s'acheminer vers un chaos total.

## 4. Conclusion

### 4.1 « Vers une architecture » : nouvelle ?

L'essor du numérique s'accompagne à l'évidence d'un « sentiment neuf », d'un engouement, d'un « Zeitgeist ».

Serait-on à l'aube d'un nouveau cycle d'architecture ?

Comme dans les années 20' où Le Corbusier rassemblant textes et propos publiés dans la revue « l'Esprit nouveau » pour en faire son célèbre ouvrage « Vers une architecture » annonçait l'avènement d'un nouveau cycle d'architecture :

*« Le public, désintéressé des questions d'atelier, ne s'attache qu'à l'idée d'une architecture nouvelle susceptible de lui apporter un confort déjà entrevu par ailleurs (le tourisme automobile, les croisières sur mer, etc.), mais surtout la satisfaction d'un sentiment neuf ».*<sup>86</sup>

Qu'est-ce qui arrive, se dessine et se destine avec l'architecture numérique ? L'impact réel du numérique dans le processus de conception architectural serait-il d'ampleur équivalente à ce qui s'est passé en Italie aux XV<sup>ème</sup> et XVI<sup>ème</sup> siècles où comme le signale Antoine Picon ce grand moment fondateur de l'architecture fut lui aussi marqué par la mise au point -et leur maîtrise- des outils de représentation du projet.

Force est de constater que s'est mise en place une esthétique nouvelle véhiculant de nouveaux codes de représentation, de nouvelles images.

Tel est le cadre problématique dans lequel s'inscrit la collection de projets rassemblée ici et qui ne présente pas que des œuvres abouties, certaines demeurant à un stade expérimental, d'autres tendant plus vers le design que

86. Le Corbusier, *Vers une architecture*, Paris, Flammarion, Champs, 2008, p. 1, [ÉO. Paris, Crès et Cie, 1923]

l'architecture mais en rapport avec la préoccupation première qui guide notre démarche : la capacité de l'architecture numérique et plus particulièrement celle des algorithmes non linéaires ou des systèmes complexes à concevoir de l'architecture.

Ces projets ont été répertoriés selon les outils morphogénétiques utilisés au cours de leur processus de conception. Instruments empruntés à des horizons divers avec des finalités parfois très éloignées de l'architecture comme par exemple l'algorithme du système à réaction-diffusion destiné à rendre compte des phénomènes chimiques.

#### 4.2 Le déficit architectural des images numériques

Les expérimentations architecturales à partir des algorithmes des systèmes complexes donnent à voir des images séduisantes, intrigantes, sidérantes. Cette capacité à captiver le regard, à le transporter ailleurs constitue à l'évidence leur force première, difficile d'ignorer leur charge, leur impact. Il suffit par ailleurs de parcourir une revue d'architecture ou de design ou de surfer sur le net aux mêmes rubriques pour constater l'emprise grandissante des images virtuelles.

Mais passé ce choc initial saisissant, médusant, que disent ces images de l'architecture ? Il y a aussi cette difficulté qui doit être signalée que la plupart des textes des auteurs présentant leur projet sont souvent abscons, certes cela tient au fait que le vocabulaire employé dans l'architecture numérique est souvent sans rapport avec le vocabulaire architectural, mais aussi parce que l'architecture visée dans ces projets et expérimentations demeure dans une définition incertaine. Il y aurait comme un déficit d'architecture qui

condamnerait les images et représentations de l'architecture numérique à être plus des métaphores d'architecture que des projets réellement architecturaux et renverrait cette dernière à n'être qu'une production d'objets éphémères, de performances artistiques.

Est-ce un hasard si des concepts comme l'auto organisation, l'émergence, la complexité, comme le remarque Antoine Picon, ont presque immédiatement été adoptés par les architectes<sup>87</sup>. Mais sont-ils seulement comme il nous le laisse entendre de simples « concepts » marketing (ainsi le succès de la notion de pli développée par Deleuze)

Cette nouvelle architecture, quelle en serait alors la définition ?

Rem Koolhaas commissaire de la Biennale d'architecture de Venise 2014 est présenté dans le journal Le Monde comme « un théoricien majeur de la discipline » :

*« Je propose à travers cette exposition une explication des éléments de la maison, comme les fenêtres, les escaliers, les balcons... incontournables pour l'architecte comme l'utilisateur. Elle montre combien l'architecture est un art schizophrène, entre la longue histoire de la discipline et le futur technologique. Dans la salle consacrée au feu dialoguent le tout premier être (228 000 ans av. J.-C.) et le thermostat connecté Nest. Nous avons invité des institutions (le MIT, l'université de Shenzhen...) pour montrer qu'il s'agit d'une histoire à la fois globale et très concrète. Cette démonstration met aussi en valeur des artisans qui travaillent sur l'amélioration du quotidien. Et, pour la première fois, la*

*87. Des sciences de la vie, les concepteurs numériques ont aussi retenu des thèmes clefs comme la complexité et l'émergence. Plus encore que la complexité, la notion d'émergence définie par Michael Hensel, Achim Menges, et Michael Weinstock comme « une explication de la façon dont les systèmes naturels ont évolué et se sont maintenus, ainsi qu'un ensemble de modèles et de processus pour la création de systèmes artificiels destinés à produire des formes », semble pleine de promesses. Par l'intermédiaire de l'ordinateur, les concepteurs tentent d'émuler la capacité des systèmes naturels à générer un ordre visible. L'émergence apparaît comme d'autant plus séduisante qu'elle semble profondément non contingente. Cherchant à justifier les formes qu'ils créent, les architectes numériques peuvent être tentés de les interpréter comme le résultat d'un processus d'émergence qui se suffit à lui-même.*

Antoine Picon, « Culture numérique et architecture : une introduction », Birkhäuser, 2010, p.215.

*biennale dure six mois au lieu de trois afin que tout le monde ait le temps de venir la voir, pas seulement les spécialistes. »*

Revenir aux fondamentaux de l'architecture : le mur, le toit, etc, une salle du pavillon central dédiée à chacun d'eux présentant leur évolution jusqu'aux toutes dernières innovations en prenant le contrepied de l'architecture véhiculée dans les belles images virtuelles. Mais s'en tenir aux composants de l'architecture suffit-il à constituer une théorie ? Rondelet, chargé du cours « théorie de l'architecture »<sup>88</sup> à l'Ecole des Beaux-Arts au début des années 1800, avait pris soin de bien distinguer dans son *Traité théorique et pratique de l'Art de bâtir* paru en 1817 les éléments concrets de l'architecture avec ceux plus immatériels mais non moins actifs qu'il regroupait sous la rubrique théorie qui engageaient concepts et notions - souvent vitruviennes-, l'histoire, les styles, etc. Notre époque qui se veut à la pointe de l'information peut-elle en être si oublieuse ?

*88. Jean Baptiste Rondelet, Traité Théorique Et Pratique de L'Art de Batir, Rondelet 1812-1817, Paris, Nabu Press, 2013, [ÉO. Paris, s.l., s.d]*

La plupart des algorithmes exportés en architecture sont ceux qui disposent d'une capacité morphogénétique importante. Autrement dit, ce sont les disciplines qui requièrent à un moment ou un autre de leur démarche un support visuel (les résultats d'expérimentations sont modélisés sous la forme d'images et de diagrammes) qui retiennent l'attention des maîtres d'œuvre. Est-ce à dire qu'il ne s'agit là que d'une séduction ignorant les questions sur la prise de décision, le sens d'une décision rationnelle, le comportement intentionnel qui sont tout aussi des sujets impliqués dans le processus de création architecturale et pour lesquelles des algorithmes ont été élaborés.

Deux choses devraient pourtant limiter la fascination des architectes face à la capacité de l'ordinateur à créer ces images nouvelles, leur constructibilité et leur habitabilité.

L'espace architectural ne résulte-t'il pas de la double détermination du plan, pour la distribution qualifiant l'usage du futur ouvrage - et de la coupe, pour la pesanteur en conditionnant la constructibilité. Cette particularité implique que ces représentations de l'architecture qui portent déjà en elles - dans leur constitution les qualités de l'espace architectural (l'usage, la pesanteur) - ne peuvent se rapporter entre elles - parce que fondamentalement hétérogènes les unes aux autres - qu'au terme d'une synthèse disjonctive. C'est ce qui semble faire défaut dans les expérimentations architecturales ayant recours aux algorithmes. Malgré leurs complications formelles, les objets analysés ici proposent des volumes homogènes sans intériorité comme si les trois dimensions répondant aux axes X, Y et Z de l'espace étaient toutes équivalentes.

Les formes compliquées des projets peuvent facilement être construites par des imprimantes 3D, or jusqu'à aujourd'hui, une imprimante 3D ne fabrique que des maquettes où les édifices apparaissent comme des objets. Les formes nouvelles se prêtent plus aisément à l'élaboration des objets du design qu'à celles des espaces architecturaux.

#### 4. 3 L'élégance à l'heure de la mondialisation

Le futur de l'architecture sera-t-il uniquement guidé par cette surenchère de l'image qui crée le déclic, ô combien consommable dans l'instant et donc à courte durée

*89. « Tout comme les phénomènes naturels, les compositions élégantes sont tellement intégrées qu'elles peuvent difficilement être décomposées en sous-systèmes indépendants – c'est une différence radicale avec le paradigme moderne de conception de la séparation claire de sous-systèmes fonctionnels. En fait, le recours à des formes naturelles telles que le relief des paysages, les morphologies organiques sont une source de transfert analogique dans l'architecture et apporte une contribution constructive au développement de ce nouveau paradigme et langage de l'architecture. »*

*Ali Rahim, Hina Jamelle, « The Economics of Elegance Migrating Coastlines: Residential Tower, Dubai », Architectural Design, vol.77, no.1, janvier-février 2007, p. 31*

périssable.<sup>89</sup> A l'heure de la mondialisation galopante, une image ou une vidéo peut être diffusée partout dans le monde pendant quelques heures pour être partagée et discutée par le très grand nombre et ensuite disparaître. Inutile de refuser de reconnaître que l'on vit dans le prélude de ce futur où les « buzz » deviennent créateurs de valeurs. Il y a encore seulement 30 ans, une réussite nécessitait des efforts, des analyses longues et minutieuses, sonder le marché, développer les produits, les faire connaître et apprécier. Mais aujourd'hui, une « belle » histoire peut se vendre à 3 milliards de personnes en moins d'une journée via les puissants outils de la communication. Personne n'a réussi à maîtriser ce phénomène d'émergence ou d'auto-organisation humaine qui impacte également l'architecture, car de plus en plus de projets sont reconnus grâce à Dailymotion, Archidaily, twitter ou même Facebook. Le « buzz » crée de la valeur et c'est ce qui explique que de nombreux projets numériques sont « fastfood ».

*« Au-delà de l'austérité des techniques numériques, l'élégance se préoccupe du raffinement, de la précision et de l'opulence formelle. Elle intègre le désir esthétique, libérant une intelligence visuelle capable de comprendre tous les domaines de la conception artistique quelle que soit leur importance. Le concept d'élégance a la capacité de faire avancer le discours de l'architecture contemporaine en acceptant que les compositions architecturales complexes nécessitent une esthétique visuelle aussi sophistiquée que les techniques actuelles utilisées pour générer leurs formes. L'élégance traduit et fait valoir la complexité. Un contrôle minutieux, une connaissance raffinée de la technique sont requis pour façonner des surfaces aux caractéristiques*

*topologiques multiples qui peuvent très bien déboucher sur le chaos. Négocier et contenir l'opulence visuelle de telles compositions est une opération qui sollicite l'élégance. »*<sup>90</sup>

Exit l'esthétique, les beaux-arts, disciplines bien trop académiques, au diable leur arsenal de principes et de concepts attentifs à la conformité, la fonctionnalité des œuvres car dans cette nouvelle partie qui s'engage le chaos devient et leur mesure et leur menace. Et en quoi cette notion d'élégance est-elle plus pertinente à en incarner les valeurs ? Est-ce comme l'avance Antoine Picon que l'architecture extraite ou déçue des Beaux-arts rejoint le design, le stylisme pour agencer et décliner des formes offertes à la consommation de masse.

On se souviendra pourtant que cette notion jadis élitiste et aristocratique se souciait de justesse et d'agrément. Et qu'aujourd'hui considérant notre condition post-moderne : privée de repères, hantée par le nihilisme, ayant renoncé aux grands récits légitimateurs, elle se pose comme un des critères d'appréciation pragmatique de l'œuvre architecturale. Le Corbusier ne parlait-il pas de « solution élégante »<sup>91</sup> et Frank Gehry relate que le tombé des vêtements tels que rendus dans la sculpture baroque<sup>92</sup> l'inspire plus que les formes générées numériquement.

90. Ali Rahim, Hina Jamelle, « *The Economies of Elegance Migrating Coastlines: Residential Tower, Dubai* », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, p. 31

91. *Le Corbusier Défense de l'architecture, Lettre à K.Teigge écrite en 1927 et publiée pour la première fois en français dans L'Architecture d'Aujourd'hui N°10, 1933.*

92. LEMONIER Aurélien, MIGAYROU Frédéric (dir.), *Frank Gehry, catalogue de l'exposition présentée de l'octobre 2014 au janvier 2015, Centre Pompidou, Paris, PRESTEL, 2015*

#### 4.4 L'opérativité architecturale des notions numériques

*« Initialement, une définition paramétrique était tout simplement une formule mathématique dans laquelle il suffisait de substituer des valeurs à quelques paramètres pour générer des variations à l'intérieur d'entités définies. Aujourd'hui, elle est utilisée pour signifier que l'entité une fois générée peut être facilement changée. C'est là que les paramétriques deviennent importantes pour la CAO. Les entités paramétriques portent leurs attributs et propriétés au sein de leur représentation, ce qui leur permet d'être manipulées et transformées en fonction de ces propriétés. Et si elles fonctionnent très bien dans l'ingénierie, elles laissent beaucoup à désirer en architecture. La nature de la conception architecturale est telle que les éléments qui composent la structure ne peuvent être manipulés et évoluer sans que la structure évolue dans son ensemble. Ainsi, ils fonctionnent mieux lorsque leur caractère est encastré dans leur représentation interne, plutôt que d'être traités comme des attributs détachés plus ou moins extérieurs. Pour développer de telles représentations paramétriques complètes d'éléments architecturaux, il faut évaluer, comprendre et interpréter le comportement inhérent de ces éléments; ce processus peut en fait être très subjectif, ce qui est une manifestation assez caractéristique de la conception architecturale. »*<sup>93</sup>

Les problèmes que pose la transposition des algorithmes génératifs sont bien différents de ceux rencontrés dans l'architecture paramétrique tels que les décrit Chris Yessios mais ils se heurtent tout autant à des obstacles, comme si l'architecture- ce qui en fait sa consistance- résistait à leurs

93. Chris Yessios "Is there more to come? In *Architecture in the digital age-design & manufacturing* Edited by Branko Kolarevic

applications d'où le constat du déficit des images architecturales.

Frank Gehry dans un entretien avec Frédéric Migayrou (catalogue exposition Frank Gehry Beaubourg) narre l'aventure avec un des informaticiens travaillant avec lui sur la conception du projet de la DZ bank à Berlin. Sa réaction agacée, violente aux lignes et formes générées par CATIA qui lui semblent fades, sans consistance l'affectent dans sa sensibilité d'architecte. On touche là un des points délicats de la conception architecturale qui est faite de tensions, de contradictions, d'émotions, ou pour parler comme Le Corbusier de commotions<sup>94</sup>, or l'ordinateur n'a pas d'affect. Mais pour autant les processus de morphogénèses des algorithmes génératifs ne sont pas linéaires, ils produisent de la complexité et font émerger de l'imprévu.

Pourtant les procédures mises en œuvre dans les algorithmes non linéaires ont recours à des notions, des concepts qui ont une accointance, une affinité avec ceux véhiculés dans le corpus des ouvrages traitant de la théorie architecturale, comme par exemple celle du local et du global avec l'eurythmie <sup>95</sup>, ou celles de l'auto poïesis et de l'émergence avec la logique myope qui caractérisent l'invention propre au projet architectural visant « une précision capable de rimer avec ouverture et indétermination ». <sup>96</sup>

L'architecture des algorithmes des systèmes complexes met en œuvre -mieux que l'architecture paramétrique- des procédés inédits parfois aux antipodes de ceux conventionnels voire sclérosés à l'œuvre dans la conception architecturale, mais cette mise à distance précipitée avec le passé doit-elle pour autant être oublieuse de ce qui ce

94. « Car l'architecture est un événement indéniable qui surgit en tel instant de la création où l'esprit, préoccupé d'assurer la solidité de l'édifice, d'apaiser les désirs de confort, se trouve soulevé par une intention plus élevée que celle de simplement servir et tend à manifester les puissances lyriques qui nous animent et nous donnent la joie».

Le Corbusier, *Une maison, un palais*, Paris, Les Editions G Cres & Cie, Collection de l'Esprit nouveau, 1928, p

95. « L'eurythmie (*Eurhythmia*), c'est le beau nombre (*bel numero*) et la gracieuse manière (*Venusta species* ou en italien *Maniera bella*) qui procure à tout ce qui est composé de parties son effet harmonieux. Elle est atteinte quand les parties de l'œuvre conspirent de sorte que, de la hauteur à la largeur, et de la largeur à la hauteur, tout corresponde à sa mesure propre (*sua symmetria*)».

Pierre Caye : « le savoir de Palladio – Architecture, métaphysique et politique dans la Venise du Cinquecento » p 109 *L'esprit et les formes* Editions Klincksieck

96. Arnaldo Rivkin : « Partitions » in *La ville par strates – le projet urbain en coupe* » ENSAV

constitue la substance de l'architecture qu'elle se dise  
« Venustas » ou « espace indicible ».

## Bibliographie

### 1) Ouvrages

ALLIGOOD Kathleen T., SAUER Tim D., YORKE James A., *CHAOS: An Introduction to Dynamical Systems*, New York, Springer, « Textbooks in Mathematical Sciences », 1996, 604 p.

ARNOLD Vladimir I., *Lectures on Partial Differential Equations*, Berlin, Springer, « Universitext », 2004, 162 p., trad. En. de Roger Cook, [ÉO. Moscow, PHASIS, 1997]

ASHBY William Ross, *Introduction to Cybernetics*, Londres, Chapman & Hall, 1957, 295p.

BAR-YAM Yanner, *Dynamics of Complex Systems*, Reading MA, Addison-Wesley, « Studies in Nonlinearity », 1997, 865 p.

BATTERMAN Robert W., *The Devil in the Details: Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, New York, Oxford University Press, « Oxford Studies in Philosophy of Science », 2002, 155 p.

BEDAU Mark A., *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*, Cambridge MA, MIT Press, 2008, 481 p.

BURRY Jane, BURRY Mark, *Mathématiques et architecture*, Arles, Actes Sud, 2010, 271 p., trad. Fr. de Bruno Marmioli, [ÉO. Londres, Thames & Hudson Ltd, 2010]

CARPO Mario, *The Alphabet and the Algorithm*, Cambridge, MIT Press, 2011, 182 p.

CLAYTON Philip, *Mind & Emergence, From Quantum to Consciousness*, Oxford, Oxford University Press, 2004, 249 p.

D'Arcy W. Thompson, *On Growth and Form*, Cambridge, Cambridge University Press, 1952, 1116 p. [1<sup>ère</sup> ed. Dover Publications, 1942]

DELEUZE Gilles, *LE PLI. Leibniz et le baroque*, Paris, Les Editions de Minuit, « Critique », 1988, 192 p.

DELEUZE Gilles, GUATTARI Félix, *Qu'est-ce que la philosophie*, Paris, Editions de Minuit, « Critique », 1991, 220 p.

DREO Johann, PETROWSKI Alain, TAILLARD Éric, SIARRY Patrick, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Paris, Eyrolles, 2003, 372 p.

FALCONER Kenneth, *FRACTAL GEOMETRY, Mathematical Foundations and Applications*, Chichester, John Wiley & Son Ltd, 2003, 359 p. [1<sup>ère</sup> ed. John Wiley & Sons Ltd, 1990]

FERBER Jacques, *Les Système Multi-agents, vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions, 1995, 513 p.

FIELD Michael, GOLUBITSKY Martin, *Symmetry in Chaos: A Search for Pattern in Mathematics, Art and Nature*, Oxford, Oxford University Press, 1992, 214 p.

FISHWICK Paul, *Aesthetic Computing*, Cambridge, MIT Press, « Leonardo », 2008, 456 p.

FLAKE Gary William, *The Computational Beauty of Nature*, Cambridge, MIT Press, « Bradford Books », 2000, 420 p.

FRAZER John, *An Evolutionary Architecture*, Londres, Architectural Association Publications, 1995, 126 p.

FOCILLON Henri, *Vie des formes*, Paris, PUF, « Quadrige », 1993, 131 p., [1<sup>ère</sup> ed. PUF, 1943]

GEORG Flachbart, WEIBEL Peter, *Disappearing Architecture, From Real to Virtual Quantum*, Basel, Birkhauser, 2005, 272 p.

GERIDAN Jean-Michel, LAFARGUE Jean-Nöel, *Processing : Le code informatique comme outil de création*, Paris, Pearson, 2011, 300 p.

GIGERENZER Gerd, SELTEN Reinhard, *Bounded Rationality: The Adaptive Toolbox*, Cambridge, MIT Press, 2002, 366 p.

HAECKEL Ernst, *Art Forms in Nature*, New York, Dover Publications Inc, 2007, 100 p. [1<sup>ère</sup> ed. Leipzig & Wien, Bibliographisches Institut, 1899-1904]

HALL Brian K., *Evolutionary Developmental Biology*, Halifax, Springer, 1999, 484 p. [1<sup>ère</sup> ed. Kluwer Academic Publishers, 1999]

HARARY Frank, *Graph Theory*, Reading, Addison-Wesley Publishing Company, 1969, 281 p.

HOLLAND John H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems, An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, Cambridge, MIT Press, 1992, 227 p. [1<sup>ère</sup> ed. The University of Michigan, 1975]

IWAMOTO Lisa, *Digital Fabrications, Architectural and Material Techniques*, New York, Princeton Architectural Press, 145 p.

KOLAREVIC Branko, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York, Spon Press, 2003, 441 p.

KOMOSINSKI Maciej, ADAMATZKY Andrew, *Artificial Life Models in Hardware*, Bristol, Springer, 2009, 280 p.

KOMOSINSKI Maciej, ADAMATZKY Andrew, *Artificial Life Models in Software*, Bristol, Springer, 2005, 349 p.

KRAUEL Jacobo, *Architecture et design contemporain: Conception et fabrication numériques*, Barcelona, Links, 2010, 387 p.

KWINTER Sanford, *Architectures of Time, Toward a Theory of the Event in Modernist Culture*, Cambridge, MIT Press, 2003, 237 p.

LANGTON Christopher G., *Artificial Life: An Overview*, Cambridge, MIT Press, « Complex Adaptive Systems », 1995, 340 p.

LAUB Julia, BOHNACKER Hartmut, GROß Benedikt, LAZZERONI Claudius, *Design génératif – Concevoir, programmer, visualizer*, Paris, Editions Pyramid, 2011, 478 p.

Le Corbusier, *Une maison, un palais*, Paris, Les Editions G Cres & Cie, « Collection de l'Esprit nouveau », 1928, 228 p.

Le Corbusier, *Vers une architecture*, Paris, Flammarion, Champs, 2008, p. 1, [ÉO. Paris, Crès et Cie, 1923]

LEVY Pierre, *L'intelligence collective: Pour une antropologie du cyberspace*, Paris, La Découverte, « La Découverte/ Poche », 1994, 245 p.

LI Biao, *Architectural Generative Design: Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design*, Nanjing, Southeast University Press, 2012, 258 p.

LYNN Greg, *Archéologie du numérique, Cahier d'observation*, Montréal, Sternberg Press, 2013, 396 p.

MACARTHY John, *Defending AI Research: A Collection of Essays and Reviews*, Stanford, CSLI Publications, 1996, 145 p.

MANDELBROT Benoît, *LES OBJETS FRACTALS Forme, hasard et dimension*, Paris, Flammarion, « Champs », 1995, 220 p., [1<sup>ère</sup> ed. Paris, Flammarion, 1975]

MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, W.H. Freeman & Co Ltd, 1982, 249 p.

MAINZER Klaus, CHUA Leon, *The Universe as Automaton, From Simplicity and Symmetry to Complexity*, Heidelberg, 2012, 112 p.

MATURANA Humberto R., VARELA Francisco J., *Autopoiesis and cognition: The Realization of the Living*, « Boston Studies in the Philosophy and History of Science », Kluwer Academic Publishers, 1980, 176 p.

MINATI Gianfranco, PESSA Eliano, *Emergence in Complex, Cognitive, Social, and Biological Systems*, New York, Springer, 2002, 389 p.

MITCHELL Melanie, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge, MIT Press, 1996, 162 p.

MITCHELL Melanie, *Complexity, A Guided Tour*, Oxford, Oxford Press, 2009, 366 p.

NEWMAN James R., *The World of Mathematics*, New York, Simon and Schuster, 1956, 2614 p.

OXMAN Neri, *Material-Based Design Computation*, PhD Thesis, Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2009, 330 p.

PRIGOGINE Ilya, NICOLIS G., *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*, New York, John Wiley & Sons Inc, 1977, 504 p.

PRIGOGINE Ilya, *Introduction to Thermodynamics of irreversible processes*, New York, Interscience Publishers (John Wiley & Sons Inc), 1968, 164 p. [1<sup>ère</sup> ed. Springfield, Charles C Thomas Publishers, 1955]

SAYAMA Hiroki, *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*, publication prévue en 2015

SILVESTRI Chiara, *Perception et Conception en Architecture Non-Standard*, PhD Thesis, Université Montpellier II, 2009, 213 p.

PICON Antoine, *Culture numérique et architecture : une introduction*, Basel, Birkhäuser, 2010, 217 p.

PRUSINKIEWICZ P., Lindenmayer Aristid, *The Algorithmic Beauty of Plants*, New York, Springer, 1996, 234 p.

REAS Casey, FRY Ben, MAEDA John, *Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists*, Cambridge, MIT Press, 2007, 768 p.

RIVKIN Arnaldo, *La Ville par Strates, le projet urbain en coupe*, Versailles, ENSAV, 2011, 341 p.

RONDELET Jean Baptist, *Traité Théorique Et Pratique de L'Art de Batir, Rondelet 1812-1817*, Paris, Nabu Press, 2013, [ÉO. Paris, s.l, s.d]

SCHUMACHER Patrik, *The Autopoiesis of Architecture, a new framework for architecture*, New York, John Wiley & Sons Ltd, 240 p.

SIMON Herbert Alexander, *Models of Man: Social and Rational Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*, New Jersey, John Wiley & Sons Inc, 1957, 287 p.

STEEB Willi-Hans, *Nonlinear Workbook: Chaos, Fractals, Cellular Automata, Neural Networks, Genetic Algorithms, Gene Expression*, New Jersey, World Scientific, 2008, 604 p. [1<sup>ère</sup> ed. World Scientific, 1999]

TERZIDIS Kostas, *Algorithmic Architecture*, Oxford, Architectural Press, 2006, 177 p.

TIERNEY Therese, *Abstract Space, beneath the media surface*, Abingdon, Taylor & Francis, 2007, 196 p.

TOFFOLI Tommaso, MARGOLUS Norman, *Cellular Automata Machines: A New Environment for Modeling*, MIT Press, « MIT Press Series in Scientific Computation », 1987, 260 p.

VEREBES Tom, LIU Yanchuan, XU Feng, *New Computational Paradigms in Architecture*, Beijing, Tsinghua University Press, 2012, 384 p.

VON NEUMANN John, *Theory of Self-reproducing Automata*, Champaign, University of Illinois Press, 1966, 388 p.

WILSON Robert A., KEIL Frank C., *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*, Cambridge, MIT Press, 2001, 1092 p.

WOOLDRIDGE Michael, *An Introduction to MultiAgent Systems*, Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2002, 366 p.

WOLFRAM Stephen, *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, 1280p.

YUAN Philip F., LEACH Neil, *Fabricating the Future*, Shanghai, Tongji University Press, 2012, 229 p.

## 2) Publications, périodiques, articles

ALEXANDER Christopher, « The Question of Computers in Design », *Landscape*, no.14, printemps, 1967, p.6

BECHTHOLD Martin, « The Return of the Future: A Second Go at Robotic Construction », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 116-121

BEDAU Mark A., « Artificial life: organization, adaptation and complexity from the bottom up », *TRENDS in Cognitive Sciences*, vol.7 no.11, novembre 2003, pp.505-512

BIANCHI Leonora, DORIGO Marco, GAMBARDELLA Luca Maria, GUTJAHR Walter J., « A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization », *Natural Computing: an international*, vol 8 (2), Juin 2009, pp.239–287

BOLLINGER Klaus, GROHMANN Manfred, TESSMANN Oliver, « Structured Becoming: Evolutionary Processes in Design Engineering », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 14-23

BOURGINE Paul, STEWART John, « Autopoiesis and Cognition », *Artificial Life*, vol.10, no.3, pp.327-345

BRATTON Benjamin H., ALONSO Herman D., « Notes on Designing Surficial Elegance », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 88-89

BRAYER Marie-Ange (dir.), *Biothing [Alisa Andrasek]*, catalogue de l'exposition présentée du septembre au novembre 2009, FRAC Centre, Orléans, Editions HYX, 2009, 143 p.

BRAYER Marie-Ange, MIGAYROU Frédéric (dir.), *naturaliser l'architecture naturalizing*, catalogue de l'exposition présentée du septembre 2013 au mars 2014, FRAC Centre, Orléans, Editions HYX, 2013, 292 p.

BRAYER Marie-Ange (dir.), *architectures expérimentales 1950-2012*, Orléans, Edition HYX, 2013, 637 p.

BURKE Anthony, « After BitTorrent: Darknets to Native Data », *Architectural Design*, vol.76, no.5, septembre-octobre, 2006, pp. 88-95

COHEN Preston S., « Elegance, Attenuation, Geometry: Herta and Paul Amir Building, Telaviv Museum of Art », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 54-61

CRAWFORD John David, « Introduction to bifurcation theory », *Reviews of Modern Physics*, vol.63, no.4, Octobre 1991, pp.991-1037

DELANDA Manuel, « Material Elegance », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 18-23

FLAJOLET Philippe, PARIZOT Etienne, « Qu'est-ce qu'un algorithme? », *interstices.info*, 24 février 2004, URL: [https://interstices.info/jcms/c\\_5776/quest-ce-quun-algorithme](https://interstices.info/jcms/c_5776/quest-ce-quun-algorithme)

GAGE Mark F., « Deus Ex Machina: From Semiology to the Elegance of Aesthetics », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 82-85

GOLDBLATT David, « Lightness and Fluidity: Remarks Concerning the Aesthetics of Elegance », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 10-17

GRAMMAZIO Fabio, KOHER Matthias, OESTERLE Silvan, « Encoding Material », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 108-115

HALL Brian K., « Evo-Devo: evolutionary developmental mechanisms », *International Journal of Developmental Biology*, no.47, 2003, pp.491-495

HENSEL Michael, MENGES Achim, WEINSTOCK Michael (eds.), « Techniques and Technologies in Morphogenetic Design », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 5-127

HENSEL Michael, « Introduction towards Self-Organisational and Multiple-Performance Capacity in Architecture », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 5-11

HENSEL Michael, « Computing Self-Organisation: Environmentally Sensitive Growth Modelling », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 12-17

HENSEL Michael, MENGES Achim, « Differentiation and Performance: Multi-Performance Architectures and Modulated Environments », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 60-69

HENSEL Michael, MENGES Achim, « Material and Digital Design Synthesis », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 88-97

JONES Bryan D., « Bounded Rationality », *Annu. Rev. Polit. Sci.*, 1999. 2, pp. 297-321

KELLER Ed, LEITAO Carla, « Agent Intellects: Pattern as a Form of Thought », *Architectural Design*, vol.76, no.5, septembre-octobre, 2006, pp. 10-17

KENNON Kevin, « Does Collaboration Work », *Architectural Design*, vol.76, no.5, septembre-octobre, 2006, pp. 50-53

KWINTER Sanford, « Discours sur la Méthode », in GEISER Reto, *Explorations in Architecture: Teaching, Design, Research*, Basel, Birkhauser, 2008, pp. 34-47

Le Corbusier, Défense de l'architecture, Lettre à K.Teigge écrite en 1927 et publiée pour la première fois en français dans *L'Architecture d'Aujourd'hui*, no.10, 1933

LORENZ Edward N., « Deterministic Nonperiodic Flow », *J. Atmos. Sci.*, vol 20, 1963, pp.130-141

LEMONIER Aurélien, MIGAYROU Frédéric (dir.), *Frank Gehry*, catalogue de l'exposition présentée de l'octobre 2014 au janvier 2015, Centre Pompidou, Paris, PRESTEL, 2015, 255 p.

MANDELBROT Benoît, « Les fractales et l'art de la rugosité », *TED Talk*, février 2010, URL :

[http://www.ted.com/talks/benoit\\_mandelbrot\\_fractals\\_the\\_art\\_of\\_roughness](http://www.ted.com/talks/benoit_mandelbrot_fractals_the_art_of_roughness)

MANDELBROT Benoit, « Les fractales, les monstres et la beauté », *le débat*, no.24, mars 1983, pp. 65-66

MENGES Achim, « Instrumental Geometry », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 42-53

MENGES Achim, « Manufacturing Diversity », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 70-77

MENGES Achim, « Polymorphism », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 78-87

MOREL Philippe, « Computational Intelligence: The Grid as a Post-Human Network », *Architectural Design*, vol.76, no.5, septembre-octobre, 2006, pp. 100-103

MULLER Gerd B., « Evo-devo: extending the evolutionary synthesis », *Nature Reviews Genetic* 8, pp. 943-949

OXMAN Neri, « Structuring Materiality: Design Fabrication of Heterogeneous Materials », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 78-85

OXMAN Rivka, OXMAN Robert, « The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 14-23

RAHIM Ali, JAMELLE Hina, « Elegance in the Age of Digital Technique », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 6-9

RAHIM Ali, JAMELLE Hina, « Surface Continuity: An Elegant Integration », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 39-43

RAHIM Ali, JAMELLE Hina, « Beyond the Structural Skin Zaha Hadid Architects: Marsa Dubai Residential Tower », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 62-65

RAHIM Ali, JAMELLE Hina, « The Economies of Elegance Migrating Coastlines: Residential Tower, Dubai », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 66-75

RAPPAPORT Nina, « A Deeper Structural Theory », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 122-129

RASHID Hani, « Performing Elegance », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 76-81

REYNOLDS C.W., «Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. » *Computer Graphics*, vol.21, no.4, juin 1987, pp. 25-34

ROE Gerard H., WHIPPLE Kelin X, FLETCHER Jennifer K., «Feedbacks among climate, erosion, and tectonics in a critical wedge orogen », *American Journal of Science*, vol.308, septembre 2008. pp. 815-842

ROSA Joseph, « Fabricating Elegance: Digital Architecture's Coming of Age», *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 90-97

SCHOENAUER M., EIBEN A.E., « Evolutionary computing », *Information Processing Letters*, no.82, 2012, pp.1-6

SCHUMACHER Patrik, « Arguing for Elegance », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 28-37

SPILLER Neil, « Digital Solipsism and the Paradox of the Great 'Forgetting' », *Architecture Design*, vol. 80 (4), John Wiley & Sons, 2010, pp. 130-134

TUCKER Warwick, « A Rigorous ODE Solver and Smale's 14th Problem », *Foundations of Computational Mathematics*, vol.2, juillet 2002, pp.53-117

TURING Alan M., « The Chemical Basis of Morphogenesis », *Biological Sciences*, vol.237, no.641, août 1952, pp.37-72

TURING Alan M., « Computing Machinery and Intelligence », *Mind, New Series*, vol.59, no.236, octobre 1950, pp.433-460

VAN BERKEL Ben, BOS Caroline, « Everything is Curved: The Mercedes-Benz Museum, Stuttgart, Germany », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 44-53

WEINSTOCK Michael, STATHOPOULOS Nikolaos, « Advanced Simulation in Design », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 54-59

WEINSTOCK Michael, « Self-Organisation and the Structural Dynamics of Plants », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 26-33

WEINSTOCK Michael, « Self-Organisation and Material Constructions », *Architectural Design*, vol.76, no.2, mars-avril, 2006, pp. 34-41

WOLFRAM Stephen, « Universality and Complexity in Cellular Automata », *Physica D*, no.10, janvier 1984, pp. 1-35

XIE Y.M., FELICETTI P., TANG J.W., BURRY M.C., « Form Finding for Complex Structures Using Evolutionary Structural Optimization Method », *Design Studies*, vol.26, no.1, janvier 2005, pp. 55-72

YOON Meejin, « (K)not a Loop », *Architectural Design*, vol.77, no.1, janvier-février 2007, pp. 86-87

### 3) Communications

BAK Per, PACZUSKI Maya, « Complexity, contingency, and criticality », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1994

KENNEDY James, EBERHART Russell, « Particle Swarm Optimization », *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, 1995, pp. 1942-1948

RIEDL Christoph, BLOHM Ivo, LEIMEISTER Jan Marco, KRUMHOLTZ Helmut, « Rating Scales for Collective Intelligence in Innovation Communities: Why Quick and Easy Decision Making Does Not Get it Right », *Proceedings of Thirty First International Conference on Information Systems (ICIS'10)*, St. Louis, MO, USA, 2010

## Sources iconographiques

Fig. 1.1 SNOOKS Roland, *Speculative Research*, 2010, URL:

<http://kokkugia.com/ornamental-agentbodies>

Fig. 1.2 WIDRIG Daniel, *Tower Study No.7*, 2012, URL:

<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Tower Study NO 7>

Fig. 1.3 SHARPE Douglas, *Generative Design Computing. Sharpe – Project 2*, 2010,

URL: <http://dougwsharpe.blogspot.fr/2010/10/generative-design-computing-sharpe.html>

Fig. 1.4 FATES Nazim, *le modèle d'Ising*, 2002, URL :

[http://nazim.fates.free.fr/Epistemo/IntroAC/introduction\\_automates\\_cellulaires.html#\[Turing52\]](http://nazim.fates.free.fr/Epistemo/IntroAC/introduction_automates_cellulaires.html#[Turing52])

Fig. 1.5 Schéma Liang MA, 2014

Fig. 1.6 Autodesk, *Bloc dynamic*, 2012, URL:

<http://exchange.autodesk.com/autocadmep/fra/online-help/BLDSYS/2012/FRA/pages/WS73099cc142f48755f2fc9df120970276f7-7ac5.htm>

Fig. 1.7 Amniosya Architecture, *Pedestrian Bridge for Amsterdam*, 2012, URL:

<http://amniosya.blogspot.fr/>

Fig. 1.8 DIAZ Federico, *Resonance*, 2007, URL: <http://www.federicodiaz.net/>

Fig. 1.9 HANSMEYER Michael, *Platonic Solids*, 2010, URL: [http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html)

Fig. 1.10 YAU Adrian, MORALES Frisly C., EASTER Jason, WAWRZENCZYK Lukasz, *Cultural Center in Guadalajara Competition Entry*, 2013, URL: <http://www.archdaily.com/376217/cultural-center-in-guadalajara-competition-entry-adrian-yau-frislycolopmorales-jason-easter-lukasz-wawrzenczyk/>

Fig. 1.11 SAYAMA Hiroki, *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*, 2010, p.5  
URL: <http://bingweb.binghamton.edu/~sayama/textbook/Sayama-opensuny-draft-02162015.pdf>

Fig. 1.12 HAECKEL Ernst, *Art Forms in Nature*, New York, Dover Publications Inc, 2007, p.1, [1<sup>ère</sup> ed. Leipzig & Wien, Bibilographisches Institut, 1899-1904]

Fig. 2.1 HANSMEYER Michael, *Subdivided Columns*, 2010, URL: <http://www.michael-hansmeyer.com/projects/columns.html?screenSize=1&color=0#13>

Fig. 2.2 HANSMEYER Michael, *Voxel-based Geometries: Reaction-diffusion form*, 2009, URL: <http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels.html?screenSize=1&color=0#2>

Fig. 2.3 HANSMEYER Michael, *Voxel-based Geometries: Cellular Automata*, 2009, URL: [http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels\\_info.html?screenSize=1&color=0](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info.html?screenSize=1&color=0)

Fig. 2.4 MOREL Philippe, AGID Felix, FERINGA Jelle, *Model Chair T1-M*, 2010, URL: <https://scriptedbypurpose.wordpress.com/participants/ezct/>

Fig. 2.5 SNOOKS Roland, *Cliff House*, 2012, URL: <http://kokkugia.com/cliff-house>

Fig. 2.6 SANCHEZ Jose, *BLOCK*, 2014, URL: <http://www.plethora-project.com/games/>

Fig. 2.7 Anthill Art, *Fire Ant Colony*, 2013, URL: <http://www.anthillart.com/>

Fig. 2.8 Photo D. Dibenski, *Flocage des stariques*, 1986

Fig. 2.9 Joseph A. Sarafian, *Emergent porosity*, 2011, URL: <http://www.evolo.us/architecture/research-institute-is-a-study-on-emergent-porosity-through-genetic-algorithms/>

Fig. 2.10 Le ruban de Möbius, *Encyclopédie LAROUSSE*, URL: <http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/M%C3%B6bius/70750>

Fig. 2.11 La bouteille de Klein, *Source Internet*, URL : <http://memepix.com/O3yqc>

Fig. 2.12 Mcbride Charles Ryan, *Klein Bottle House*, 2008, URL: <http://www.mcbridecharlesryan.com.au/#/projects/klein-bottle-house/>

Fig. 2.13 Aspirateur robot, *Source Internet*, URL: <http://reviews.wikinut.com/img/63hpkcmmo6dv4d8o/Robot-vacuum-cleaner>

Fig. 2.14 Gramazio & Kohler et Raffaello D'Andrea, *Flight Assembled Architecture*, 2011, URL: <http://www.frac-centre.fr/projets-64.html?authID=304&ensembleID=1082>

Fig. 2.15 AYALA Jorge, *Le Cabinet de Curiosité Post-Digitales*, 2014, URL: <http://www.ayarchitecture.com/cabinet-of-postdigital-curiosities>

Fig. 2.16 Minimaforms, *Becoming Animal*, 2011, URL: <http://minimaforms.com/#item=becominganimalmoma>

Fig. 2.17 STRZELEC Dominik, *Am Ostbahnhof Berlin Hackerspace*, 2012, URL: <http://www.dataisnature.com/?p=1594>

Fig. 2.18 HANSMEYER Michael, *L-Systems in Architecture*, 2003, URL: <http://michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&color=0>

Fig. 2.19 ÇAM Daghan, *Endemic Interstices – Phase 2*, 2012, URL: <http://daghancam.blogspot.fr/2012/01/endemic-interstices-phase-2.html>

Fig. 2.20 Minimaforms, *Archigram Revisited*, 2013, URL: <http://minimaforms.com/archigram/>

Fig. 2.21 TUCKER Warwick, *Attracteur étrange de Lorenz*, « A Rigorous ODE Solver and Smale's 14th Problem », *Foundations of Computational Mathematics*, vol.2, juillet 2002, p.55

Fig. 2.22 NICHOLAS Paul, SCHORK Tim, FRUMAR Jerome, CROWE Scott,  
MACDONNELL Matthew, *Strange Attractor*, 2010, URL:  
<http://mesne.net/blog/?portfolio=strange-attractor>

**[LABF03]** Lab Architecture Studio, *Federation Square*, 2003, URL:  
<http://www.labarchitecture.com/projects/federation%20square.html>

**[HENG03]** Heneghan Peng Architects, *The Grand Egyptian Museum*, 2003, URL:  
<http://www.hparc.com/work/the-grand-egyptian-museum/>

**[MICL03]** HANSMEYER Michael, *L-Systems in Architecture*, 2003, URL:  
<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&color=0>

**[MICS06]** HANSMEYER Michael, *Subdivided Pavilions*, 2006, URL:  
[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/initial\\_subdivision\\_studies.html?screenSize=1&color=0](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/initial_subdivision_studies.html?screenSize=1&color=0)

**[SJER07]** SJET, *Recursive Growth*, 2007, URL:  
[http://sjet.us/PHILA\\_RECURSIVE\\_GROWTH.html](http://sjet.us/PHILA_RECURSIVE_GROWTH.html)

**[MICP10]** HANSMEYER Michael, *Platonic Solids*, 2010, URL: [http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html)

**[BIOA09]** BIOTHING, *Arborics*, 2009, URL: <http://www.biothing.org/?cat=13>

[KOKR09] Kokkugia, *Roussel Recursions*, 2009, URL :

<http://www.kokkugia.com/roussel-recursions>

[SIPS09] Supermanoeuvre, *SuperMatter*, 2009, URL:

<http://supermanoeuvre.com/supermattersculptures/>

[BIOA10] BIOTHING, *a\_Maze*, 2010, URL: <http://www.biothing.org/?cat=9>

[JEAL10] Ateliers Jean Nouvel, *Le Louvre d'Abu Dhabi*, 2010, URL :

<http://www.jeannouvel.com/en/desktop/home/#/en/desktop/projet/louvre-abou-dabi>

[DAGF10] CAM Dağhan, *Fabware*, 2010, URL:

<http://daghancam.blogspot.fr/2011/01/fabware.html>

[MICS10] HANSMEYER Michael, *Subdivided Columns*, 2010, URL:

<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/columns.html>

[AKIB11] HIRATA Akihisa, *Bloomberg Pavilion*, 2011, URL:

<http://www.hao.nu/project/bbg/bbg1.html>

[NICT12] CASAS Nicolo, *Turbulence*, 2012, URL:

<http://www.niccolocasas.com/TURBULENCE>

[DANF12] WIDRIG Daniel, *FractalForms*, 2012, URL:

<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=FractalForms>

**[DAND12]** WIDRIG Daniel, *Degenerate Chair*, 2012, URL:  
[http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Degenerate\\_Chair](http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Degenerate_Chair)

**[DAND13]** WIDRIG Daniel, *De-Optimised Chair*, 2013, URL:  
[http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=DeOptimised\\_Chair](http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=DeOptimised_Chair)

**[SPAF13]** SPAN, *Formation*, 2010-2013, URL:  
<http://www.archdaily.com/127503/formations-a-span-exhibition-at-the-mak-gallery/>

**[EZCS13]** EZCT, *Studies in Recursive Lattice*, 2013, URL:  
[http://thibaultschwartz.com/?g1\\_work=archilab-2013-w-ezctfrac-centre-2013](http://thibaultschwartz.com/?g1_work=archilab-2013-w-ezctfrac-centre-2013)

**[CASM02]** REAS Casey, *Microimage Software*, 2002, URL:  
[http://reas.com/microimage\\_s2/](http://reas.com/microimage_s2/)

**[KOKL04]** Kokkugia, *LT Collins ST Baths*, 2004, URL: <http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS>

**[OCEJ04]** Ocean, *Jyväskylä Music and Arts Center*, 2004, URL: <http://www.ocean-designresearch.net/index.php/design-mainmenu-39/architecture-mainmenu-40/jyvylainmenu-68>

**[CASP05]** REAS Casey, *Process 4*, 2005, URL: [http://reas.com/compendium\\_lecture/](http://reas.com/compendium_lecture/)

**[BIOO06]** BIOTHING, *Orbita Series*, 2006, URL: <http://www.biothing.org/?p=34>

**[MINA08]** Minimaforms, *Archigram Revisited*, 2008, URL:

<http://minimaforms.com/archigram/>

**[SUPT08]** Supermanoeuvre, *Trabeculae*, 2008, URL :

<http://supermanoeuvre.com/trabeculaetower/>

**[SUPL08]** Supermanoeuvre, *Living Morphologies*, 2008, URL :

<http://supermanoeuvre.com/living-morphologies/>

**[SJET08]** Sjet, *Transient States*, 2008, URL :

[http://www.sjet.us/PHILA\\_TRANSIENT\\_STATES.html](http://www.sjet.us/PHILA_TRANSIENT_STATES.html)

**[THEG09]** THEVERYMANY, *Growth & Morphologies*, 2009, URL:

<http://theverymany.com/with/10-growth/>

**[BIOM09]** BIOTHING, *Mesonic Fabrics*, 2007-2009, URL:

<http://www.biothing.org/?p=51>

**[CASP10]** REAS Casey, *Process 18*, 2010, URL: [http://reas.com/p18\\_s/](http://reas.com/p18_s/)

**[BIOG10]** BIOTHING, *Ghatkopar India School Façade*, 2010, URL:

<http://www.biothing.org/?cat=20>

**[BIOP10]** BIOTHING, *PHOSPHORESCENCE*, 2010, URL:

<http://www.biothing.org/?cat=23>

[ERAE11] Eragatory, *Excessive Studio II*, 2011, URL:  
<http://eragatory.blogspot.fr/2011/07/excessive-studio-ii-final.html>

[ERAM11] Eragatory, *Music Pavilion*, 2011, URL:  
<http://eragatory.blogspot.fr/2011/01/secondary-presentation-finals-excessive.html>

[DAGC11] CAM Dağhan, *Crafted Tower*, 2011, URL:  
<http://daghancam.blogspot.fr/2011/05/craftedtower.html>

[DAGE11] CAM Dağhan, *Endemic Interstices Phase I*, 2011, URL:  
<http://daghancam.blogspot.fr/2011/06/endemic-interstices-phase-1.html>

[ERAS12] Eragatory, *Smudge*, 2012, URL:  
<http://eragatory.blogspot.fr/2011/09/smudge.html>

[DANT12] WIDRIG Daniel, *Tower Study No 7*, 2012, URL:  
[http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Tower\\_Study\\_NO\\_7](http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Tower_Study_NO_7)

[DANG12] WIDRIG Daniel, *Grid*, 2012, URL:  
<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Grid>

[THED12] THEVERYMANY, *Double Agent White*, 2012, URL:  
<http://theverymany.com/constructs/12-atelier-calder/>

[SJE12] Sjet, *Biomolecular Self-Assembly*, 2012, URL:  
[http://www.sjet.us/TED\\_GLOBAL2012.html](http://www.sjet.us/TED_GLOBAL2012.html)

[MARG12] WATZ Mariuz, *Grid Distorsion*, 2008-2012, URL:

<http://www.unlekker.net/proj/griddistortions/>

[BIOB12] BIOTHING, *Bloom*, 2012, URL: <http://www.bloom-thegame.com/main/>

[KOKS12] Kokkugia, *Speculative Research*, 2010-2012, URL:

<http://www.kokkugia.com/stigmergic-landscape>

[MINS12] Minimaforms, *Soft Cast*, 2012, URL: <http://minimaforms.com/soft-cast-2/>

[JOSM12] SANCHEZ Jose, *Moth*, 2012, URL: [http://plethora-](http://plethora-project.com/completeworks/2012/04/27/moth/)

[project.com/completeworks/2012/04/27/moth/](http://plethora-project.com/completeworks/2012/04/27/moth/)

[ISAK13] BLOCH Isaie, RESTIN Gilles, *Karosta [KUBE]*, 2013, URL:

[http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal\\_17.html](http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal_17.html)

[JENE13] SABIN Jenny, *eSKIN*, 2007-2013, URL : <http://jennysabin.com/?p=953>

[JENP13] SABIN Jenny, *Polymorph Digital Ceramics*, 2009-2013, URL:

<http://jennysabin.com/?p=909>

[AYAC09] [Ay] Architecture, *Cabinet of postdigital curiosities*, 2009, URL:

<http://www.ayarchitecture.com/cabinet-of-postdigital-curiosities>

[JOSP14] SANCHEZ Jose, *Polyomino*, 2014, URL : [http://plethora-](http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/23/polyomino-exhibition/)

[project.com/completeworks/2014/11/23/polyomino-exhibition/](http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/23/polyomino-exhibition/)

[EZCC04] EZCT, *Chair Model T1-M*, 2004, URL: <http://www.ezct.net/>

[JORB06] Joris Laarman Lab, *Bone Furniture*, 2006, URL:  
<http://www.jorislaarman.com/bone-furniture.html>

[DRIB10] Driessens & Verstappen, *Breed*, 2010, URL:  
<http://notnot.home.xs4all.nl/breed/Breed.html>

[NATN11] HOLLAND Nate, *N/A*, 2011, URL: <https://vimeo.com/22253596>

[MINA06] NIXON Minifie, *Australian Wildlife Health Centre*, 2006, URL:  
[http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian\\_wildlife\\_centre](http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian_wildlife_centre)

[BIOC08] BIOTHING, *CA04*, 2008, URL: <http://www.biothing.org/?cat=16>

[MATP09] Matsys, *P\_Wall*, 2009, URL:  
[http://matsysdesign.com/2009/08/11/p\\_wall2009/](http://matsysdesign.com/2009/08/11/p_wall2009/)

[MICV09] HANSMEYER Micahel, *Voxel-based Geometries*, 2009, URL:  
[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels\\_info3.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info3.html)

[BIAC07] LI Biao, *Architectural Generative Design: Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design*, Nanjing, Southeast University Press, 2012, p.115

[MICV09] HANSMEYER Michael, *Voxel-based Geometries*, 2009, URL:  
<http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels.html?screenSize=1&color=1>

[DAGR10] CAM Dağhan, *reTUR(n) INGmatter*, 2010,  
URL:<http://daghancam.blogspot.fr/2010/12/returningmatter.html>

[DOMS12] STRZELEC Dominik, *Saturation*, 2012, URL:  
<http://www.triangulation.jp/2012/02/speculative-apps-by-dominik-strzelec.html>

[NERP12] OXMAN Neri, *Pneuma 2*, 2012, URL:  
<http://www.materialecology.com/projects/details/pneuma-2>

[JOSB14] SANCHEZ Jose, *Block*, 2014, URL: <http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/22/block-video-game/>

Fig. 3.1 MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, 1982, p.142.

Fig. 3.2 MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, 1982, p.142.

Fig. 3.3 Heneghang Peng Architectes, *Le projet du Grand Musée égyptien*, 2003,  
URL : <http://www.hparc.com/work/the-grand-egyptian-museum/>

Fig. 3.4 Heneghang Peng Architectes, *Le projet du Grand Musée égyptien*, 2003,  
URL : <http://www.hparc.com/work/the-grand-egyptian-museum/>

Fig. 3.5 MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, 1982, p.44.

Fig. 3.6 Biothing, *A\_maze*, 2010, URL: <http://www.biothing.org/?p=46>

Fig. 3.7 : *Flocon de Koch*, source internet, URL:  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Flocon de Koch](http://fr.wikipedia.org/wiki/Flocon_de_Koch)

Fig. 3.8 : *Flocon de Koch*, source internet, URL:  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Flocon de Koch](http://fr.wikipedia.org/wiki/Flocon_de_Koch)

Fig. 3.9 : HIRATA Akihisa, *Le Pavillon Bloomberg*, 2011, URL :  
<http://www.hao.nu/project/bbg/bbg1.html>

Fig. 3.10 : HIRATA Akihisa, *Le Pavillon Bloomberg*, 2011, URL :  
<http://www.hao.nu/project/bbg/bbg1.html>

Fig. 3.11 : *Courbe de Lévy*, source internet, URL :  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe de L%C3%A9vy](http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_de_L%C3%A9vy)

Fig. 3.12 : *Courbe de Lévy*, source internet, URL :  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe de L%C3%A9vy](http://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_de_L%C3%A9vy)

Fig. 3.13 : *Courbe de Lévy*, source internet, URL :  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:L%C3%A9vy C curve \(3D-twist\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:L%C3%A9vy_C_curve_(3D-twist).jpg)

Fig. 3.14: WIDRIG Daniel, *FractalForms*, 2012, URL:  
<http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=FractalForms>

Fig. 3.15: MANDELBROT Benoît, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, New York, 1988, p. 188.

Fig. 3.16: *La fractale de Lyapunov*, source internet, URL:  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fractale\\_de\\_Lyapunov](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fractale_de_Lyapunov)

Fig. 3.17: *Mandelbulb*, source internet, URL:  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandelbulb\\_p8a.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandelbulb_p8a.jpg)

Fig. 3.18: SPAN, *Recursive Formation*, 2010-2013, URL:  
<http://sojexurde.net/about/>

Fig. 3.19: *Mandelbulb*, source internet, URL:  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandelbulb\\_p8a.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandelbulb_p8a.jpg)

Fig. 3.20: HANSMEYER Michael, *Platonic Solids*, 2010, URL: [http://michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html?screenSize=1&color=1](http://michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html?screenSize=1&color=1)

Fig. 3.21: HANSMEYER Michael, *Platonic Solids*, 2010, URL: [http://michael-hansmeyer.com/projects/platonic\\_solids.html?screenSize=1&color=1](http://michael-hansmeyer.com/projects/platonic_solids.html?screenSize=1&color=1)

Fig. 3.22: WIDRIG Daniel, *Degenerate Chair*, 2012, URL:  
[http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Degenerate\\_Chair](http://www.danielwidrig.com/index.php?page=Work&id=Degenerate_Chair)

Fig. 3.23: HANSMEYER Michael, *Subdivided Columns*, 2010, URL: <http://michael-hansmeyer.com/projects/columns.html?screenSize=1&color=1>

Fig. 3.24: Biothing, *Arborics*, 2009, URL: <http://www.biothing.org/?p=191>

Fig. 3.25: Biothing, *Arborics*, 2009, URL: <http://www.biothing.org/?p=191>

Fig. 3.26: CAM Dağhan, *Fabware*, 2010, URL: <http://daghancam.blogspot.fr/2011/01/fabware.html>

Fig. 3.27: CAM Dağhan, *Fabware*, 2010, URL: <http://daghancam.blogspot.fr/2011/01/fabware.html>

Fig. 3.28: Supermanoeuvre, *SupperMatter*, 2009, URL: <http://supermanoeuvre.com/supermattersculptures/>

Fig. 3.29: Supermanoeuvre, *SupperMatter*, 2009, URL: <http://supermanoeuvre.com/supermattersculptures/>

Fig. 3.30: Supermanoeuvre, *SupperMatter*, 2009, URL: <http://supermanoeuvre.com/supermattersculptures/>

Fig. 3.31: HANSMEYER Michael, *L-systems in Architecture*, 2003, URL: <http://michael-hansmeyer.com/projects/l-systems.html?screenSize=1&color=1>

Fig. 3.32: *Turbulence d'une aile d'avion*, source internet, URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbulence>

Fig. 3.33 : CASAS Niccolo, *Turbulence*, 2012, URL :

<http://www.niccolocasas.com/TURBULENCE>

Fig. 3.34 : CASAS Niccolo, *Turbulence*, 2012, URL :

<http://www.niccolocasas.com/TURBULENCE>

Fig. 3.35- Fig. 3.40d: SIMS Karls, *Reaction-Diffusion Tutorial*, URL:

<http://www.karlsims.com/rd.html>

Fig. 3.41- Fig. 3.44: ÇAM Dağhan, *reTUR(n)NGmatter*, 2010, URL:

<http://daghancam.blogspot.fr/2010/12/returningmatter.html>

Fig. 3.45: HANSMEYER Michael, *Voxel-based Geometries*, 2009, URL:

<http://michael-hansmeyer.com/projects/voxels.html?screenSize=1&color=1>

Fig. 3.46: HANSMEYER Michael, *Voxel-based Geometries*, 2009, URL:

<http://michael-hansmeyer.com/projects/voxels.html?screenSize=1&color=1>

Fig. 3.47: *Belousov-Zhabotinsky reaction*, source internet, URL:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Belousov%E2%80%93Zhabotinsky\\_reaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Belousov%E2%80%93Zhabotinsky_reaction)

Fig. 3.48: STRZELEC Dominik, *Saturation*, 2012, URL:

<http://www.dataisnature.com/?p=1594>

Fig. 3.49: STRZELEC Dominik, *Saturation*, 2012, URL:

<http://www.dataisnature.com/?p=1594>

Fig. 3.50: HADID Zaha, *Abu Dhabi Performing Arts Centre*, 2007

Fig. 3.51: ITO Toyo, *Taichung metropolitan opera house*, 2009

Fig. 3.52: WOLFRAM Stephen, *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p. 424.

Fig. 3.53- Fig 3.56: WOLFRAM Stephen, *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p.25, p.263.

Fig. 3.57: *Jeu de la vie*, source internet, URL:

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Automate\\_cellulaire#/media/File:Life.gif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Automate_cellulaire#/media/File:Life.gif)

Fig. 3.58: NIXON Minifie, *Australian Wildlife Health Centre*, 2006, URL:

[http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian\\_wildlife\\_centre](http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian_wildlife_centre)

Fig. 3.59: NIXON Minifie, *Australian Wildlife Health Centre*, 2006, URL:

[http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian\\_wildlife\\_centre](http://www.mvsarchitects.com.au/doku.php?id=home:projects:australian_wildlife_centre)

Fig. 3.60: WOLFRAM Stephen, *A New Kind of Science*, Champaign, Wolfram Media, 2002, p.424

Fig. 3.61: Biothing, *CA04*, 2008, URL: <http://www.biothing.org/?p=263>

Fig. 3.62: Biothing, *Mesonic Fabrics*, 2007, URL: <http://www.biothing.org/?p=51>

Fig. 3.63: Biothing, *Mesonic Fabrics*, 2007, URL: <http://www.biothing.org/?p=51>

Fig. 3.64: Morphocode, *Rabbit*, URL: <http://morphocode.com/rabbit/>

Fig. 3.65: HANSMEYER Micahel, *Voxel-based Geometries*, 2009, URL:  
[http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels\\_info3.html](http://www.michael-hansmeyer.com/projects/voxels_info3.html)

Fig. 3.66- Fig. 3.69: LI Biao, *Architectural Generative Design: Searching for CAS-Based Methods of Generative Art in Architectural Design*, Nanjing, p.115.

Fig. 3.70: *Processus d'AG*, source internet, URL:  
<http://ist.csu.edu.cn/ai/Ai/chapter3/342.htm>

Fig. 3.71- Fig. 3.73f: *Tutorial de Galapagos*, URL:  
<http://tesignstudio.blogspot.fr/2012/03/galapagos-grasshopper.html>

Fig. 3.74: XIE Mike, *Evolutionary Structural Optimisation*, URL:  
<http://www1.rmit.edu.au/browse/Research/Institutes,%20Centres%20and%20Groups/Centres/Innovative%20Structures%20and%20Materials/Projects/Evolutionary%20Structural%20Optimisation/>

Fig. 3.75: *ESO*, source internet, URL:

[https://www.youtube.com/watch?v=Sz\\_gHkVpIRA](https://www.youtube.com/watch?v=Sz_gHkVpIRA)

Fig. 3.76, Fig. 3.78: ISOZAKI Arata, *Qatar National Convention Center*, 2013, URL:

<http://www.designboom.com/architecture/qatar-national-convention-centre-in-doha-by-arata-isozaki-and-rhwl-architects/>

Fig. 3.77, Fig. 3.78: ITO Toyo, *Island City Central Park*, 2008, URL:

<http://www.designboom.com/architecture/toyo-ito-awarded-frederick-kiesler-prize-for-architecture-and-the-arts/>

Fig. 3.79: Joris Laarman Lab, *Bone Furniture*, 2006, URL:

<http://www.jorislaarman.com/bone-furniture.html>

Fig. 3.80: Joris Laarman Lab, *Bone Furniture*, 2006, URL:

<http://www.jorislaarman.com/bone-furniture.html>

Fig. 3.81: EZCT, *Chair Model T1-M*, 2004, URL: <http://www.ezct.net/>

Fig. 3.82: EZCT, *Chair Model T1-M*, 2004, URL: <http://www.ezct.net/>

Fig. 3.83- Fig. 3.85: HOLLAND Nate, *Projet de Nate Holland*, 2011, URL:

<https://vimeo.com/23061345>

Fig. 3.86: Driessens & Verstappen, *Breed*, 2010, URL:

<http://notnot.home.xs4all.nl/breed/Breed.html>

Fig. 3.87: Driessens & Verstappen, *Breed*, 2010, URL:

<http://notnot.home.xs4all.nl/breed/Breed.html>

Fig. 3.88: *Flocage des oiseaux*, source internet, URL:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm\\_behaviour](http://en.wikipedia.org/wiki/Swarm_behaviour)

Fig. 3.89: *Bancs de poissons*, source internet, URL :

<http://lanaturedeleau.blogspot.fr/2013/09/eau-et-information-2.html>

Fig. 3.90: *Colonie des fourmies*, source internet, URL :

[http://www.radiokapi.net/files/image\\_file\\_1795.jpg](http://www.radiokapi.net/files/image_file_1795.jpg)

Fig. 3.91a: REAS Casey, *Process 4*, 2005, URL:

[http://reas.com/compendium\\_lecture/](http://reas.com/compendium_lecture/)

Fig. 3.91b: REAS Casey, *Process 4*, 2005, URL:

[http://reas.com/compendium\\_lecture/](http://reas.com/compendium_lecture/)

Fig. 3.92: Biothing, *Seroussi Pavillion*, 2007, URL: <http://www.biothing.org/?p=24>

Fig. 3.93: Biothing, *Orbita Series*, 2006, URL: <http://www.biothing.org/?p=34>

Fig. 3.94: WATZ Mariuz, *Grid Distorsion*, 2008-2012, URL:

<http://www.unlekker.net/proj/griddistortions/>

Fig. 3.95: SABIN Jenny, *Polymorph Digital Ceramics*, 2009-2013, URL:

<http://jennysabin.com/?p=909>

Fig. 3.96a: CAM Dağhan, *Endemic Interstices Phase I*, 2011, URL:

<http://daghancam.blogspot.fr/2011/06/endemic-interstices-phase-1.html>

Fig. 3.96b: CAM Dağhan, *Endemic Interstices Phase I*, 2011, URL:

<http://daghancam.blogspot.fr/2011/06/endemic-interstices-phase-1.html>

Fig. 3.97a: Sjet, *Biomolecular Self-Assembly*, 2012, URL:

[http://www.sjet.us/TED\\_GLOBAL2012.html](http://www.sjet.us/TED_GLOBAL2012.html)

Fig. 3.97b: Sjet, *Biomolecular Self-Assembly*, 2012, URL:

[http://www.sjet.us/TED\\_GLOBAL2012.html](http://www.sjet.us/TED_GLOBAL2012.html)

Fig. 3.98a: Supermanoeuvre, *Living Morphologies*, 2008, URL:

<http://supermanoeuvre.com/living-morphologies/>

Fig. 3.98b: Supermanoeuvre, *Living Morphologies*, 2008, URL:

<http://supermanoeuvre.com/living-morphologies/>

Fig. 3.99a: Kokkugia, *LT Collins ST Baths*, 2004, URL: [http://www.kokkugia.com/LT-](http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS)

[COLLINS-ST-BATHS](http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS)

Fig. 3.99b: Kokkugia, *LT Collins ST Baths*, 2004, URL: [http://www.kokkugia.com/LT-](http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS)

[COLLINS-ST-BATHS](http://www.kokkugia.com/LT-COLLINS-ST-BATHS)

Fig. 3.100a: Supermanoeuvre, *Trabeculae*, 2008, URL:

<http://supermanoeuvre.com/trabeculaetower/>

Fig. 3.100b: Supermanoeuvre, *Trabeculae*, 2008, URL:

<http://supermanoeuvre.com/trabeculaetower/>

Fig. 3.101: Biothing, *Orbita Series*, 2006, URL: <http://www.biothing.org/?p=34>

Fig. 3.102: BIOTHING, *Mesonic Fabrics*, 2007-2009, URL:

<http://www.biothing.org/?p=51>

Fig. 3.103a: BIOTHING, *PHOSPHORESCENCE*, 2010, URL:

<http://www.biothing.org/?cat=23>

Fig. 3.103b: BIOTHING, *PHOSPHORESCENCE*, 2010, URL:

<http://www.biothing.org/?cat=23>

Fig. 3.104: Archigram, *Living Pod*, 1966, URL:

<http://spime.tumblr.com/post/523867873/living-pod-1966-c-david-greene-archigram>

Fig. 3.105: GREENE David, *Living Pod Tower*, 2008, URL:

<http://www.aaschool.ac.uk/PUBLIC/WHATSON/exhibitions.php?item=65>

Fig. 3.106- Fig. 3.109b: Minimaforms, *Archigram Revisited*, 2008, URL:

<http://minimaforms.com/archigram/>

Fig. 3.110: Eragatory, *Smudge*, 2012, URL:

<http://eragatory.blogspot.fr/2011/09/smudge.html>

Fig. 3.111a: BLOCH Isaie, RESTIN Gilles, *Karosta [KUBE]*, 2013, URL: [http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal\\_17.html](http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal_17.html)

Fig. 3.111b: BLOCH Isaie, RESTIN Gilles, *Karosta [KUBE]*, 2013, URL: [http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal\\_17.html](http://www.eragatory.blogspot.be/2014/01/karosta-kube-winning-proposal_17.html)

Fig. 3.112: *Fold.it*, 2008, URL: <http://fold.it/portal/info/about>

Fig. 3.113: *Fold.it*, 2008, URL: <http://fold.it/portal/info/about>

Fig. 3.114: SANCHEZ Jose, *Block*, 2014, URL: <http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/22/block-video-game/>

Fig. 3.115: SANCHEZ Jose, *Block*, 2014, URL: <http://plethora-project.com/completeworks/2014/11/22/block-video-game/>