

Approche multi-agents de couplage de modèles pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux

Application à l'aménagement urbain de la ville de Métouia

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le Décembre 2014

pour l'obtention du

Doctorat de l'université Pierre et Marie Curie – Paris VI

Doctorat de l'université Tunis

(spécialité informatique)

par

Inès Hassoumi

Composition du jury

Directeurs de thèse : Pr. Khaled Ghedira, Pr. Jean Daniel Zucker

Co-encadrants de thèse : Dr. Christophe Lang, Dr. Nicolas Marilleau, Dr. Moncef Temani

Je dédie cette thèse

A ALLAH pour m'avoir donné une âme, un esprit et un corps sains qui m'ont permis de réaliser ce travail

A la mémoire de mon arrière grand père, Béchir Hassoumi,
à qui nous devons tous, ce niveau d'éducation

A mon père, pour sa confiance, sa patience et ses encouragements

A ma mère, pour son soutien, sa douceur, son attention et sa compréhension

A ma grand-mère, pour ses ferventes prières, qui m'ont ouvert toutes les portes du succès

A mon frère et sa femme pour leur confiance et leurs encouragements

A ma sœur pour son attention et sa patience

A toute la famille Hassoumi, dont je suis fière de porter le nom

A tous mes enseignants qui ont contribué dans mon cursus scolaire, secondaire et universitaire

A Eryj Ben Sassi pour sa précieuse amitié, son énergie et ses bonnes intuitions

A ma machine pour son ardeur et sa robustesse durant

toutes ces années

A *au café des nattes de Sidi Bou said et tous ses employés pour m'avoir offert un agréable cadre de travail*

A *ma future petite famille pour avoir accepté de céder la place à la thèse avant de s'installer confortablement dans ma vie*

A *Carthage pour sa prestigieuse histoire et sa future résurrection*

A *Métouia et ses habitants pour m'avoir soufflé l'idée de ce projet qui a donné naissance à cette thèse*

A *ma chère Tunisie, en lui souhaitant un prochain décollage vers le développement et la prospérité*

Remerciements

C'est avec une profonde gratitude et un immense plaisir que je formule mes remerciements à l'encontre de toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

D'abord, je tiens à remercier mes encadrants Dr Nicolas Marilleau , Dr Christophe Lang et Dr Moncef Temani qui par leur disponibilité, leur bonne humeur et leurs précieux conseils m'ont permis de mener ma tâche à son terme dans les meilleures conditions.

J'exprime ma profonde gratitude pour mes directeurs de thèse Pr Jean Daniel Zucker et Pr Khaled Ghedira d'avoir accepté de diriger mes travaux de thèse. Je remercie également tout le corps enseignant et administratif de l'université Paris VI, de l'Institut de Recherche pour le développement et de l'Institut Supérieur de Gestion de Tunis pour avoir assuré la bonne organisation de cette thèse en cotutelle.

Je présente mes expressions de reconnaissance aux membres de l'unité M2A de l'Ecole Nationale de l'Architecture et de l'Urbanisme, en particulier Dr Alia Belkaid, Dr Ali Zribi et Pr Abdel Kader Ben Saci pour leur précieuse collaboration et pour avoir mis à ma disposition le local et le matériel du laboratoire tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens aussi, à exprimer ma plus profonde gratitude à Mr Fethi Ferid Fen-Douli du bureau AUDAce : Architecture, Urbanisme, Décoration et Aménagement pour tous les documents fournis et le temps consacré pour répondre à mes questions. Je remercie en particulier Mr Jihed Khadher pour sa précieuse collaboration, son engagement et ses conseils utiles.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail dont Mr Makram Blagui de l'Office de la Topographie et du Cadastre, Mr Abdelkader Moussa et tous les employés du Ministère de l'équipement pour toute leur aide.

Mes remerciements s'adressent, par ailleurs à Dr Salem Ben Fadhel, Dr Yassine Turki, Dr Mabrouk Hatira et Dr Fethi el Gabsi de l'Institut Supérieur des Technologies de l'Environnement, de l'Urbanisme et du Bâtiment pour leurs précieux conseils.

Mes remerciements s'adressent enfin à tous mes enseignants, mes amis et toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
} هُوَ أَنْشَأَكُمْ مِنَ الْأَرْضِ وَاسْتَعْمَرَكُمْ فِيهَا }
[هود: 61]

Table des matières

Partie I : Fondements de la modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage de modèles

Chapitre 1 Systèmes complexes spatiaux	3
1.1 Introduction	3
1.2 Théorie des systèmes complexes	4
1.2.1 Qu'est-ce qu'un système complexe spatial?	4
1.2.2 Modélisation multi-échelles des systèmes complexes spatiaux	7
1.3 Modèles et paradigmes pour la modélisation des dynamiques spatiales	9
1.3.1 Modèles mathématiques	10
1.3.2 Modèles à base de systèmes experts et de réseaux de neurones	11
1.3.3 Modèles à base d'automates cellulaires	12
1.3.4 Modèles orientés agents	13
1.4 Les SMA dans les phénomènes spatiaux complexes	15
1.4.1 Des agents autonomes aux systèmes multi-agents	15
1.4.2 Le paradigme multi-agents dans la modélisation de la complexité spatiale	19
1.4.3 Les SMA, les sciences sociales et les dynamiques urbaines	21
1.5 Positionnement et critiques	23

Chapitre 2 La ville comme un système complexe spatial, social, émergent et multi-échelles	25
2.1 Introduction	25
2.2 La complexité des systèmes urbains	26
2.2.1 Le milieu urbain, un organisme vivant complexe qui s'auto-organise .	26
2.2.2 Les échelles de la ville	28
2.3 Des approches de planification pour comprendre le système urbain	28
2.3.1 L'analyse multi-critères de décision (AMCD)	28
2.3.2 La prospective	29
2.4 Des outils d'aide à la décision pour la planification urbaine	30
2.5 Composants et modèles du système urbain	33
2.5.1 La dynamique démographique	34
2.5.2 La dynamique économique	37
2.5.3 La dynamique de la mobilité urbaine	39
2.5.4 La dynamique d'occupation du sol	41
2.6 Intégrer des processus pour étudier une question spatiale complexe	44
2.7 Positionnement et critiques	47
Chapitre 3 Le couplage pour modéliser des systèmes complexes spatiaux	49
3.1 Introduction	49
3.2 Définitions et utilités du couplage	50
3.2.1 Définitions du couplage	50
3.2.2 Avantages du couplage	51
3.3 Éléments de couplage	51
3.3.1 Types de couplage	51
3.3.2 Difficultés de couplage	52
3.3.3 Niveaux de couplage dans le processus de modélisation-simulation .	54
3.4 Facteurs spatio-temporels dans le processus de couplage	55
3.4.1 Des méthodes de changement des échelles spatiales	55
3.4.2 Des méthodes de changement des échelles temporelles	60
3.5 Approches et plateformes de couplage des modèles	62
3.5.1 Utilisation des agents comme médiateurs de couplage	62
3.5.2 Couplage par intégration des modèles	65
3.5.3 Formalismes de couplage	67
3.5.4 Plateformes de couplage	69
3.6 Positionnement et critiques	71

Partie II : L'approche de couplage Coupling4modeling

Chapitre 4 Élever l'espace comme facteur de couplage	75
4.1 Introduction	75
4.2 Synthèse de l'état de l'art	76
4.3 Critiques et positionnement	77
4.3.1 Classification des approches de couplage	77
4.3.2 Positionnement par rapport aux solutions de couplage existantes . . .	82
4.3.3 Limites des approches de couplage existantes	83
4.4 La modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage des modèles	84
4.4.1 Enjeux du couplage dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux	84
4.4.2 Utiliser l'espace comme facteur de couplage	86
4.4.3 Un système multi-agents pour faire interagir les modèles	87
4.4.4 Un outil méthodologique et conceptuel pour une intervention pluri-disciplinaire sur l'espace	89
4.5 Un exemple fil rouge	91
4.5.1 Les modèles à coupler	91
4.5.2 Justification du choix des modèles	93
4.6 Synthèse et discussion	93
Chapitre 5 Coupling4modeling : une approche de couplage pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux	95
5.1 Introduction	95
5.2 Fondements de l'approche proposée	96
5.2.1 Notre système de couplage selon l'approche VOYELLES	96
5.2.2 La théorie de la stigmergie pour la coordination via l'environnement .	97
5.2.3 Une architecture organisationnelle hiérarchique	98
5.3 Coupling4modeling : structure et fonctionnement	101
5.3.1 L'hétérogénéité des échelles spatiales	101
5.3.2 Les temporalités des modèles à coupler	103
5.3.3 Le métamodèle de couplage	107
5.3.4 Du métamodèle à la méthodologie de couplage	111
5.4 Une méthodologie de couplage de modèles	111

5.4.1	Analyse des modèles et de l'espace	112
5.4.2	Construction de la base de connaissances spatiales	113
5.4.3	Corrélation des modèles via l'espace	114
5.4.4	Conception du modèle couplé	115
5.4.5	Encapsulation des modèles	116
5.4.6	Implantation des agents en charge du couplage	117
5.4.7	La démarche de couplage appliquée à l'exemple fil rouge	118
5.5	Synthèse et analyse de l'approche adoptée	120
Chapitre 6 De la problématique du couplage à la problématique algorithmique : application à l'exemple fil rouge		123
6.1	Introduction	123
6.2	Les algorithmes de gestion des échelles temporelles	124
6.2.1	L'algorithme principal de la gestion temporelle	124
6.2.2	Calcul de la future date d'exécution des modèles	127
6.2.3	Ordonnancement des dates d'exécution des modèles	129
6.3	Les algorithmes de gestion des échelles spatiales	131
6.3.1	L'algorithme principal de la gestion spatiale	131
6.3.2	Exécution des modèles	136
6.3.3	Collecte des données des modèles	139
6.3.4	Spatialisation des données des modèles	143
6.4	Synthèse et discussion	146
Chapitre 7 Coupling4modeling dans un environnement réel		149
7.1	Introduction	150
7.2	Contexte du projet	150
7.3	Analyse des modèles et de l'environnement de la ville de Métouia	151
7.3.1	Modèle de croissance démographique	152
7.3.2	Modèle d'occupation du sol	153
7.3.3	Modèle économique	155
7.3.4	L'espace urbain de la ville	158
7.4	Construction de la base de connaissances spatiales de Métouia	159
7.5	Corrélation des modèles de la ville de Métouia via l'espace	160
7.6	Conception du modèle couplé pour la problématique d'aménagement de Métouia	162
7.6.1	Architecture du modèle couplé	162
7.6.2	Les classes du modèle de Métouia	163
7.7	Encapsulation des modèles	165

7.8	Implantation des agents en charge du couplage dans la plateforme GAMA	166
7.8.1	Présentation de la plateforme de simulation GAMA	167
7.8.2	Application du modèle de ville de Christaller sur une grille de cellules	167
7.8.3	Couplage des trois modèles hétérogènes multi-échelles de la ville de Métouia sur la plateforme GAMA	170
7.9	Synthèse et discussion	176
Conclusion générale		177
1	Bilan	177
1.1	Synthèse et positionnement	177
1.2	Contributions scientifiques	178
2	Discussion	180
3	Coupling4modeling et directions futures	181
Bibliographie		183

Introduction générale

1 Contexte de la thèse : Modélisation des systèmes complexes spatiaux, approche par couplage

La présente recherche traite de la modélisation et de la simulation des systèmes complexes spatiaux appliquées aux espaces urbains. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la problématique d'aménagement de la ville de Métouia dans le cadre de la révision du plan d'aménagement de la ville qui s'apprête à accueillir de nouveaux projets publics, touristiques, commerciaux, etc. Cette révision cherche à réguler la gestion urbaine de la ville en tenant compte de ses problèmes socio-économiques, des pesanteurs historiques, des nouveaux besoins de ses habitants, des conflits entre les différents acteurs et la future image que sa municipalité désire lui conférer.

La ville représente un système spatial socio-économique complexe en raison du grand nombre de composants et d'acteurs situés aux différents niveaux qui la constituent, ainsi que des multiples interactions entre acteurs et entre niveaux [Lau94]. La difficulté réside alors dans la manière de faire interagir ces composants pour pouvoir observer l'évolution de la ville sur une durée de temps spécifique. C'est d'ailleurs un enjeu majeur du domaine des systèmes urbains que de pouvoir représenter la dynamique urbaine en prenant en considération les différents points de vue des intervenants sur la ville.

Cette question n'est pas propre au seul domaine des systèmes urbains, on peut l'observer dans d'autres domaines scientifiques qui font face aux mêmes types de phénomènes d'inter-influence à savoir les systèmes complexes spatiaux en général. En effet, la modélisation et la simulation des systèmes complexes spatiaux nécessite souvent une intervention fortement pluridisciplinaire où chaque équipe (géographes, mathématiciens, statisticiens, économistes, agronomes, etc) s'intéresse à une partie de la problématique spatiale étudiée [Sil10]. Ainsi chacune de ces équipes va matérialiser son intervention par des modèles et des outils propres à sa discipline. Par ailleurs, chacun de ces modèles représente un des aspects du système étudié et utilise un formalisme et des échelles différents.

L'association de ces disciplines ouvre des perspectives méthodologiques stimulantes pour les thématiciens qui s'intéressent à l'organisation de l'espace et à la compréhension des structures spatiales complexes. Par ailleurs, ce travail de thèse contribue à la fois aux recherches menées dans la communauté des systèmes multi-agents (qui nous serviront d'outil pour ce couplage), la communauté des systèmes complexes spatiaux et la communauté des systèmes urbains. Notre contribution comportera différents volets liés par le même fil directeur qui est le couplage de modèles pour l'étude des phénomènes d'inter-influences complexes spatiaux.

2 Problématique, enjeux et contribution de la thèse

La modélisation des systèmes complexes spatiaux nécessite l'intégration de composants et de concepts venant de disciplines différentes (géographie, mathématiques, statistiques, etc) intervenant sur un même espace. Il est très souvent plus utile de réutiliser des modèles conçus et validés dans le cadre de travaux antérieurs pour répondre à une question scientifique dans de nouvelles études. Notre principale motivation est notamment de savoir comment réutiliser ces modèles rarement réexploités. Ceci constitue un moyen d'aborder différemment la modélisation des systèmes complexes spatiaux.

Le couplage est appréhendé dès lors comme une solution pour mettre en commun des représentations et des références différentes dans un modèle représentant le système complexe étudié [Lin06]. Ainsi le couplage consiste à faire interagir au minimum deux modèles qui représentent chacun une dynamique particulière du système complexe à modéliser pour créer un nouveau modèle relatif à une question spécifique. Comme ces modèles proviennent de disciplines différentes, la technique du couplage implique la prise en charge de formalismes hétérogènes avec des échelles spatiales et temporelles différentes.

Il existe plusieurs modèles et plateformes dans la littérature qui utilisent le couplage des modèles pour comprendre certains phénomènes complexes. Toutefois, certaines de ces solutions manquent de généralité et restent étroitement liées à leur domaine d'application. D'autres sont souvent développées de manière ad hoc pour répondre à une question spécifique ce qui rend difficile leur réutilisation dans d'autres champs d'applications. D'autres encore restent dans un cadre très général et n'intègrent pas les spécificités des systèmes complexes spatiaux comme les aspects multi-échelles spatiale et temporelle qui caractérisent généralement les modèles à coupler. Pour répondre à ces limites, nous nous positionnons dans la catégorie des approches de couplage génériques dans le domaine de la modélisation spatiale.

Ainsi nous présentons une approche de couplage intitulée Coupling4modeling dont le but est d'externaliser une partie de la complexité des systèmes en réutilisant des outils de modélisation présents dans des domaines différents pour étudier l'impact d'un ensemble de dynamiques sur un espace donné. En effet, nous cherchons dans cette thèse à envisager autrement la modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage de modèles séparés ayant des formalismes différents et qui évoluent à des échelles spatiales et temporelles différentes.

L'idée est de capitaliser des modèles existants et de les réexploiter pour reconstruire de nouveaux modèles de systèmes complexes spatiaux en utilisant l'espace comme facteur de couplage. Notons que pour restreindre un peu notre champ d'actions, nous tâchons de formaliser des réponses à la problématique de couplage de modèles existants dans leur format théorique non implémenté encore sur une plateforme de simulation.

Par ailleurs, cette problématique générale se décline en plusieurs sous problématiques à savoir l'identification d'un facteur de couplage, la mise en place de médiateurs pour les échanges des données et la construction de mécanismes qui permettent de gérer l'hétérogénéité spatiale et temporelle des modèles à coupler.

Comme nous nous intéressons aux modèles spatiaux qui agissent sur l'espace du système complexe spatial étudié, nous portons notre attention dans cette analyse sur l'utilité de se servir de l'espace comme facteur de couplage. Ceci permet de corrélérer ces modèles et de les exécuter en prenant en considération les sorties des autres modèles [Fia01]. L'espace devient donc le cœur de notre approche puisqu'il constitue l'espace d'échange des modèles que nous avons à coupler.

Par la suite, pour assurer l’interaction des modèles, il est nécessaire de choisir une solution qui permet d’intégrer la composante de l’espace comme une unité de stockage des données modifiées par les modèles. Ainsi dans ce travail, nous explorons les solutions apportées par le cadre paradigmatic des systèmes multi-agents pour orchestrer l’ensemble des échanges dans une démarche de couplage d’un ensemble de modèles en interaction.

Ce couplage ne se fait pas cependant sans un certain nombre de contraintes à prendre en considération. En effet, comme indiqué précédemment, les modèles à coupler, repris généralement de la littérature dans le cadre d’études antérieures, n’utilisent pas forcément les mêmes formalismes ou les mêmes échelles spatiales et temporelles.

Ainsi pour qu’une approche soit adaptée aux spécificités des systèmes complexes, il faut trouver les concepts qui permettent de prendre en considération les différents niveaux d’abstraction et politiques d’exécution lors du couplage de modèles de systèmes complexes. Pour ce faire, nous proposons de créer un système multi-agents qui assure le passage d’une hiérarchie spatiale à une autre, ainsi que l’ordonnancement des dates d’exécution des modèles.

L’ensemble de ces solutions conceptuelles est structuré dans un métamodèle de couplage dont la démarche de construction est séparée en différents niveaux comme le niveau sémantique (pour spécifier comment se fait l’échange des données entre les modèles), le niveau syntaxique (qui s’intéresse au changement des formalismes) et le niveau dynamique (pour traiter les événements du couplage) pour satisfaire les contraintes de couplage définies précédemment.

Par ailleurs, lorsqu’il s’agit de modéliser des systèmes complexes spatiaux, il est nécessaire d’appréhender la problématique de couplage en plusieurs étapes. Ainsi pour répondre à cette question, nous proposons une méthodologie de couplage qui permet de décomposer l’activité de modélisation en plusieurs phases à savoir : l’analyse des modèles et de l’environnement, la construction de la base de connaissances spatiales, la corrélation des modèles via l’espace, la conception du modèle couplé, l’encapsulation des modèles, et l’implantation des agents en charge du couplage. Cette structuration de notre approche dans une méthodologie et un métamodèle a pour but de lui offrir une généricité et une réutilisation ultérieure dans le domaine de la modélisation spatiale.

Ce travail contribue également au domaine des simulations urbaines, dans la mesure où nous proposons un prototype de simulateur pour comprendre et tester l’évolution des systèmes urbains. Ce prototype permet d’appliquer notre approche de couplage sur des données réelles collectées à partir de la ville et intégrées dans un système d’information géographique.

Ce simulateur peut d’ores et déjà servir de prototype d’outil d’aide à la compréhension de la dynamique urbaine pour les urbanistes qui travaillent sur la problématique d’aménagement de la ville de Métouia notamment par sa capacité à simuler l’impact des facteurs démographiques, économiques, géographiques, du développement de la ville. De plus, de par son caractère novateur et son champ d’expérimentation interdisciplinaire, le prototype que nous développons peut permettre aux urbanistes de mieux cerner, de comprendre, voire de hiérarchiser l’importance des processus à l’œuvre dans le développement du système urbain considéré, en testant différents scénarios d’aménagement possibles.

3 Plan du manuscrit

Nous proposons une organisation du manuscrit structurée en deux parties. **La première partie** est composée de trois chapitres qui présentent les notions fondamentales importantes à

la bonne compréhension du travail effectué, comme la définition d'un système spatial complexe, d'un système urbain et les concepts relatifs au couplage. Par la suite, les quatre chapitres de la deuxième partie développent l'approche Coupling4modeling proposée dans le cadre de cette thèse.

Dans le premier chapitre, nous commençons par introduire les caractéristiques des systèmes complexes spatiaux ainsi que les méthodes qui permettent de les modéliser allant des méthodes mathématiques aux méthodes à base de systèmes experts, jusqu'aux méthodes à base d'automates cellulaires et aux méthodes orientées agents. Nous nous attardons sur l'utilisation des systèmes multi-agents dans la modélisation spatiale afin de dégager les capacités de ce paradigme à aborder des questions inhérentes aux dynamiques spatiales complexes.

Le second chapitre est consacré à l'étude de la ville qui constitue pour nous un système complexe spatial intéressant à étudier. Plus particulièrement, nous identifions trois niveaux de complexité pour la ville : spatial, temporel et décisionnel. Après avoir fait le tour des méthodes et outils d'aide à la décision permettant de modéliser la ville, nous nous intéressons aux modèles représentant les différentes dynamiques de la ville afin d'en déduire le facteur commun qui les relie.

Comme nous comptons modéliser la ville en utilisant l'ensemble de ces modèles, nous nous focalisons dans le chapitre suivant sur la problématique du couplage des modèles interdisciplinaires, hétérogènes et multi-échelles. Ainsi ce troisième chapitre est consacré à la définition du couplage, ses avantages et ses différents types. Nous distinguons également les niveaux du couplage (conceptuel, sémantique, syntaxique, dynamique et technique) avec les contraintes du couplage à satisfaire (tels que la modularité, l'hétérogénéité, l'interopérabilité, la réutilisation et la différence des échelles). Nous clôturons ainsi la partie état de l'art par les modèles et les outils de couplage utilisés dans la littérature pour connecter des modèles indépendants afin d'en dégager les principales techniques utilisées dans ces différentes démarches.

La seconde partie est composée de quatre chapitres. Tout au long de cette partie, un exemple fil rouge qui porte sur le phénomène de croissance de la biomasse dans les zones vertes urbaines, est utilisé pour illustrer les concepts de notre approche de couplage.

Ainsi dans la partie contribution et au niveau du cinquième chapitre, nous commençons par présenter notre propre classification des modèles basée sur le principe de couplage pour pouvoir nous positionner par rapport aux modèles existants. Ainsi, notre approche se situe entre la famille des modèles qui utilisent un intermédiaire de couplage et la famille des modèles qui se basent sur un facteur de couplage. Notons que la principale contribution de cette thèse consiste à proposer une approche de couplage de modèles pluridisciplinaires hétérogènes qui élève l'espace comme facteur de couplage et utilise un système multi-agent pour faire interagir les modèles.

Nous entamons dans le sixième chapitre, la structuration de l'approche de couplage Coupling4modeling afin de lui offrir une généricté et une réutilisation ultérieure dans d'autres études à caractère spatial via un métamodèle à organisation hiérarchique de type holonique et une méthodologie de couplage à différentes phases.

Par la suite, dans le septième chapitre, nous présentons les algorithmes associés au métamodèle. Ce passage algorithmique a pour but de permettre à d'autres scientifiques de réutiliser les concepts présentés dans le cadre de cette thèse pour produire d'autres résultats de simulation dans différents systèmes complexes spatiaux. La généricté des algorithmes proposés les rend réutilisables en dehors de la problématique du couplage.

Le dernier chapitre de la thèse, constitue l'implémentation de notre approche de couplage à travers un cas d'études particulier qui porte sur la problématique d'aménagement de la ville de Métouia. Nous déroulons notre méthodologie de couplage afin de pouvoir coupler les trois modèles choisis pour cette ville. Un simulateur développé sur la plateforme de couplage GAMA est couplé au système d'information géographique de la ville pour pouvoir observer l'évolution du modèle couplé. Les sorties du simulateur permettent d'analyser la corrélation des modèles qui interagissent via l'espace grâce au système multi-agent construit conformément à l'architecture de couplage Coupling4modeling. Le simulateur permet également de tester différents scénarios d'aménagement proposés par les urbanistes qui se traduisent au niveau de l'espace par une densification ou une extension de la ville.

Partie I : Fondements de la modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage de modèles

Chapitre 1

Systèmes complexes spatiaux

Sommaire

1.1	Introduction	3
1.2	Théorie des systèmes complexes	4
1.2.1	Qu'est-ce qu'un système complexe spatial ?	4
1.2.2	Modélisation multi-échelles des systèmes complexes spatiaux	7
1.3	Modèles et paradigmes pour la modélisation des dynamiques spatiales	9
1.3.1	Modèles mathématiques	10
1.3.2	Modèles à base de systèmes experts et de réseaux de neurones	11
1.3.3	Modèles à base d'automates cellulaires	12
1.3.4	Modèles orientés agents	13
1.4	Les SMA dans les phénomènes spatiaux complexes	15
1.4.1	Des agents autonomes aux systèmes multi-agents	15
1.4.2	Le paradigme multi-agents dans la modélisation de la complexité spatiale	19
1.4.3	Les SMA, les sciences sociales et les dynamiques urbaines	21
1.5	Positionnement et critiques	23

1.1 Introduction

La complexification croissante des contextes, au sein desquels nous évoluons, nous force à constater qu'il est fondamental d'adopter une approche globale de modélisation capable de saisir et de rendre compte de cette complexité [Moi05]. Dans ce chapitre nous nous intéressons à la thématique qui est à l'origine de la proposition de ce sujet de thèse à savoir la modélisation des systèmes complexes spatiaux [Moi05]. En effet, la modélisation des systèmes complexes spatiaux a suscité l'exploration de nouveaux concepts, la mise en place de diverses théories et approches auprès de nombreux chercheurs [CdJM01].

A travers ce chapitre nous allons donc commencer par introduire certaines notions nécessaires à la compréhension de ce domaine à savoir les systèmes complexes spatiaux et leurs spécificités. Nous nous intéressons par la suite aux méthodes et paradigmes utilisés pour la modélisation des dynamiques spatiales.

Tout au long de cette analyse, on présentera différentes méthodes utilisées pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux, classées selon les paradigmes qu'elles utilisent en allant des équations mathématiques, aux systèmes experts, jusqu'aux automates cellulaires et aux systèmes multi-agents qu'on reprendra avec plus de détails dans une section entière. Cet intérêt pour les systèmes multi-agents revient au fait que ce paradigme ait été fréquemment utilisé dans la modélisation des phénomènes spatiaux.

1.2 Théorie des systèmes complexes

Il est important dans le premier chapitre de définir clairement la terminologie qui sera utilisée tout au long de ce manuscrit à savoir : système, système complexe, système complexe spatial, modèle, simulateur, etc. Il s'agit dans cette première section également de préciser notre point de vue sur les concepts de l'activité de modélisation et de simulation des systèmes complexes [AP06a].

1.2.1 Qu'est-ce qu'un système complexe spatial ?

Nous introduisons donc dans ce qui suit les notions de système, système complexe, émergence, système complexe spatial et nous finirons par présenter le système urbain en tant qu'exemple de système complexe spatial.

Notion de système

Si l'on s'intéresse à la notion de système dans l'absolu on trouve dans [Fia01] qu'un système est un ensemble de construits théoriques, d'hypothèses, de façons parmi d'autres de concevoir un ensemble d'éléments ou d'entités [AP06a] dont les interactions et le mode de fonctionnement forment la dynamique globale du système. [AP06a] précisent également que les éléments d'un futur système seront constitués en posant des questions sur l'objet des études. Ceci rend la construction du système étroitement liée aux objectifs de l'étude menée. Ainsi, il est nécessaire cependant, de limiter le nombre des composants des systèmes afin de pouvoir les contrôler [AP06a].

Définition d'un système complexe

Par extension à cette définition, on peut dire qu'un système complexe est un ensemble d'entités en **interaction** dont le comportement global émerge des interactions de ces différents composants [AP06a]. Ces entités peuvent être composées, hétérogènes, mobiles et leurs propriétés peuvent varier dans le temps [Sti12]. Notons par ailleurs que plusieurs définitions ont été proposées pour la notion de système complexe. Chaque définition dépend du point de vue du modélisateur et du système complexe étudié. En effet une autre définition a été proposée dans [RSD10] pour définir le système complexe par : *"Un système est dit aussi complexe si le résultat final n'est pas prédictible directement en connaissant les règles de son évolution"*. [BP10] présente également le système complexe comme étant un ensemble *"d'entités, engagées dans des interactions non déterministes, construisant des organisations à des échelles de temps, d'espace et de nombre qui dépassent celles des trajectoires individuelles."*

En général, un système complexe est perçu comme un système composé de sous-systèmes hiérarchisés inter-connectés. Ce point de vue forme un courant fort chez les modélisateurs comme Denise Pumain qui considère que [BP10] *"La théorie des systèmes complexes constitue un cadre*

de formalisation pour des phénomènes observables où des entités, engagées dans des interactions non déterministes, construisent des organisations à des échelles de temps, d'espace et de nombre qui dépassent celles des trajectoires individuelles." Les théories des systèmes complexes se déclinent désormais dans de nouveaux domaines qui se sont élargis pour comprendre la génétique, l'économie (fluctuation des cotations à la bourse), l'écologie (le fonctionnement d'un écosystème) ou encore plus récemment, l'urbanisme (la sociologie, la géographie, la politique d'une ville) [Sch11].

L'émergence dans les systèmes complexes

Dans beaucoup d'études faites sur les systèmes complexes [Sch11], les chercheurs ont pu observer des phénomènes imprévisibles difficiles à expliquer avec les approches classiques basées sur la causalité linéaire telles que les approches réductionnistes ou mécanistiques. C'est ainsi qu'un nouveau courant s'est fortement développé afin d'apporter de nouvelles réponses aux problématiques complexes en accordant plus d'importance aux interactions entre les constituants du système pour expliquer son comportement [Sil10]. Jean-Claude Heudin [Heu94] présente ce concept par un ancien dicton qui décrit bien le cadre dans lequel on situe l'approche dite "émergentiste" : *"Le tout est plus que la somme des parties"*. Dans ses travaux, D.Hofstadter [Hof82] souligne que l'on peut parler d'émergence à partir du moment où l'information absente aux niveaux inférieurs existe au niveau des activités collectives. Cette propriété a été signalée dans plusieurs travaux [Lau91], [Sch11] suite à l'observation de l'existence de propriétés au niveau global qui ne se déduisent pas de façon directe des propriétés des parties individuelles de ce système [Sch11]. Le réseau national des systèmes complexes [RNS07], considère également que cette émergence est le résultat de l'inter-influence entre les niveaux d'agrégation microscopique et macroscopique d'un système complexe.

Quand une telle dynamique se stabilise sur un attracteur, on peut parler d'émergence d'une structure ou d'une fonctionnalité globale [Bae92]. Si l'observateur agit sur la dynamique du système, il devient un composant du moteur de l'émergence et peut faire émerger plus que ce que l'utilisateur/observateur ou le système ne pourraient faire séparément ou isolés [Bae92]. Plus généralement, nous pouvons conclure que l'apparition des propriétés émergentes augmente la complexité du système par l'ajout de nouvelles propriétés qui produisent des comportements complexes mais permettent d'un autre côté à ce système de mieux s'adapter à son environnement [Sch11]. On parle dès lors d'une nouvelle approche pour la modélisation de la complexité découlant essentiellement des propriétés d'auto-organisation et de l'émergence [Lau91], [BG09]. Ces propriétés stipulent que l'évolution des systèmes observés à un niveau macroscopique dépend des interactions entre des éléments décrits à un niveau méso ou microscopique [GMP⁺96]. Ceci explique l'apparition d'organismes aux comportements complexes à partir d'éléments unitaires et de règles d'interaction locales très simples [Sch11], ou par la simple superposition de leurs contributions individuelles [Bae92].

Le système complexe spatial

Nous introduisons dans ce paragraphe un autre aspect important dans l'étude des systèmes complexes à savoir l'ensemble des flux qui les traversent pour leur permettre d'évoluer de manière continue et fait d'eux des systèmes ouverts. Dans le domaine de la modélisation spatiale, l'environnement peut être le support de ces flux qui auront des effets spatiaux sur toute la complexité du phénomène [GBD09]. Ainsi, on parle de système complexe spatial dès lors qu'il intègre la composante de l'espace [San01] qui est à la fois l'acteur et le résultat du comportement du système [GBD09].

Plus généralement, dans ce type de systèmes complexes spatiaux, les entités ont des propriétés spatiales et sont situées dans un environnement [San01]. En plus des interactions entre les entités, on note dans ce type de système des interactions avec l'environnement [San01] étant donné que celui-ci constitue un composant à part entière dans les systèmes complexes spatiaux (Fig. 1.1). A partir de ces interactions, peuvent émerger de nouvelles structures spatiales [San01] qui agissent à leur tour sur les entités spatiales dans des boucles de rétroactions infinies (Fig. 1.1). On retrouve ces systèmes complexes spatiaux dans plusieurs domaines d'étude comme [All04] la géologie, l'épidémiologie, l'écologie, l'urbanisme etc. Nous pouvons citer le territoire, comme exemple de système complexe spatial, dont la dynamique résulte de la boucle de rétroaction entre l'espace géographique lui-même et un ensemble d'acteurs en interrelation sociale qui le gèrent, l'aménagent et l'utilisent grâce à un ensemble de règles communes appelées systèmes de représentation [CB90].

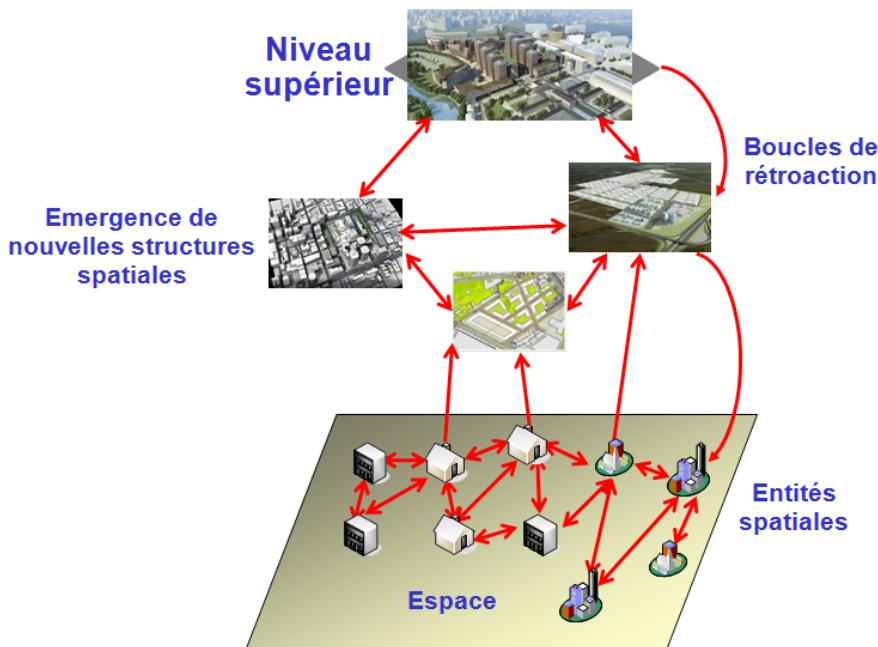


FIGURE 1.1 – Composantes et niveaux d'un système complexe spatial

Le système urbain : un système complexe spatial

Le système urbain constitue dans ce sens une organisation spatiale complexe qui peut être également émergente [GBD09]. Par exemple ces entités élémentaires peuvent être des individus ou des ménages qui se déplacent dans l'espace, qui font des choix de localisation en fonction de leurs préférences individuelles. On pourrait ainsi observer l'émergence et l'évolution de certaines configurations de l'espace résidentiel urbain (comme l'apparition de nouveaux quartiers par exemple) à partir des choix de localisation des agents. La prise de décision de ces ménages se fait en fonction des contraintes (revenus, accessibilité) et des préférences relatives à la composition socio-économique des lieux voisins ainsi que des décisions des aménageurs et promoteurs [AT03], [BH03]. Notons également que les effets de rétroaction (Fig. 1.1) sont des éléments importants de l'explication des changements des propriétés spatiales et des représentations de l'espace [All04].

Ainsi ce phénomène d'émergence de structures à certaines échelles souvent observé dans les systèmes complexes spatiaux rend en outre pertinente la prise en compte de plusieurs niveaux d'observation [Pum04]. Nous reprenons avec plus de détails la notion d'échelle et de niveau d'observation dans la section suivante.

1.2.2 Modélisation multi-échelles des systèmes complexes spatiaux

La modélisation des systèmes complexes cherche à résoudre des problèmes complexes non structurés en identifiant les causes premières et les effets ultimes des processus étudiés [Saa84]. Dans cette démarche de modélisation, il est nécessaire de percevoir clairement les éléments interactifs du système complexe, de représenter simultanément les interactions entre les entités des systèmes et de structurer les relations entre les nombreux facteurs intervenant dans la résolution de problèmes complexes [Saa84]. Tout au long de cette section nous allons introduire la terminologie relative au champ de la modélisation des systèmes complexes à savoir les notions de : modèle, métamodèle, simulateur, modélisation, modélisation de structures multi-échelles.

Modèle

A partir du moment où on parle de modélisation, il est jugé utile à ce niveau de donner une définition à la notion de modèle qui s'avère être un concept clé dans toute démarche scientifique. Plusieurs définitions ont été proposées pour le modèle durant ces dernières années : selon [Kle03], il s'agit d' "*une description d'un système dans un langage bien défini*". [Sei03] quant à lui le définit comme l'ensemble des propriétés du système. Dans [Kü75], il peut s'agir d'une abstraction du système qui peut être utilisée pour faire des prédictions ou des inférences. Prendre une abstraction du système permet au modélisateur d'ignorer une partie des caractéristiques du système [ElG07], de distinguer le particulier du général et d'établir éventuellement des lois générales [Cha04] en fonction des objectifs fixés pour le cadre étudié [ElG07]. Cette notion d'abstraction signifie que pour un même phénomène donné, il peut exister plusieurs modèles selon l'axe d'étude ou le but choisi par les chercheurs [ElG07], [Cha04] résume tout cela en disant qu'un modèle est une représentation simplifiée d'un objet réel qui donne du sens à cet objet selon l'objectif du modélisateur et nécessite de comprendre l'essentiel de ses propriétés dans une démarche décrite comme étant circulaire.

Métamodèle

Le principal objectif de la metamodélisation est de définir des langages pour la modélisation. En effet un meta-modèle est un modèle d'un langage bien défini [Kle03] ou un modèle d'un langage de modélisation [Sei03] ou encore un modèle pour les modèles comme défini par [MDA01]. Nous citons comme exemple la catégorie de langage DSL (Domain Specific Language) [MHS05] qui permet aux modélisateurs de construire ou configurer des modèles dans un domaine particulier à travers un ensemble de notations et d'abstractions appropriées. Pour les systèmes complexes, DSL permet par exemple [MHS05] la description des entités dynamiques spatialisées du système à travers l'utilisation d'un certain nombre de formalismes comme : les équations différentielles ordinaires (ODE), les équations différentielles partielles, les approches orientées agent, les processus stochastiques, les graphes, les automates, etc.

Simulateur

Dans la modélisation, outre cette association entre le système réel (celui que l'on veut étudier) et la représentation de ce système (le modèle) [Sil10], il existe aussi une différence à prendre

en considération entre le modèle et son implémentation informatique [Sud04]. Plus un modèle est complexe, plus il peut se révéler difficile à étudier en simulation [Lin06] à travers un plan d'expérience qui n'est autre qu'une méthode statistique permettant de rationaliser l'exploration de l'espace des paramètres [Bon08]. Pour aider les modélisateurs dans le processus de simulation, il existe un certain nombre d'analyses présentées par Ginot et Monod [GGB⁺06] comme : la cohérence numérique, les analyses de sensibilité aux conditions initiales et à la propagation d'erreur, les analyses de stabilité ou encore l'analyse qualitative du comportement ou encore la métamodélisation.

Modélisation

L'activité de modélisation implique une représentation simplifiée des questions à poser, par l'intermédiaire d'un modèle, un schéma expérimental, et un choix méthodologique gouverné par un paradigme qui constitue un cadre de pensée [AP06a]. Fondamentalement, il est important de structurer et d'articuler les problèmes faisant intervenir une multitude de facteurs, de paramètres et de sources d'informations diverses par la mise en place d'un cadre de pensée simple [Saa84]. Ceci passe par la construction d'un modèle représentant ses caractéristiques principales du système étudié et reliant l'observateur au phénomène étudié [Fia01]. Plus généralement, la démarche de modélisation nécessite dans tous les cas un effort de formalisation des éléments nécessaires à la compréhension des dynamiques étudiées [ElG07].

Modélisation de structures multi-échelles

La modélisation multi-échelles est une pratique qui permet de répondre à des questions se posant à un niveau global en développant un modèle à partir de données à une granularité très fine [San01]. La modélisation des systèmes complexes s'inscrit dans ce cadre dans la mesure où le comportement global est souvent une propriété émergente à partir des interactions entre les entités qui conduisent à la création d'une organisation dynamique de niveau supérieur [GBD09]. Plus la complexité des problématiques que l'on souhaite aborder augmente, plus le besoin d'avoir une modélisation qui tienne compte de plusieurs échelles augmente [Sie11]. Dans ce cadre, l'aspect "multi-échelles" d'une modélisation cherche à faciliter le choix d'un niveau particulier de description, et à permettre l'observation de structures émergentes de plus haut niveau [GQHL09].

L'intérêt d'avoir une modélisation multi-échelles est de pouvoir prendre en compte aussi bien des interactions entre les différentes échelles du système complexe que les interactions entre objets du système à une même échelle [PMKP10]. Ces deux types d'interactions déterminent la dynamique et l'organisation du système complexe. Ainsi dans ce type de modélisation, il est souvent nécessaire de considérer des entités à plusieurs niveaux d'échelles et d'organisation qui appartiennent à des dynamiques ayant des influences réciproques les unes sur les autres [QGHL10]. Pour cela, le modélisateur dispose de modèles permettant un niveau de résolution très fin ou microscopique et de modèles macroscopiques pour un même phénomène [Fia01].

Cette notion d'échelle se trouve partout dans notre rapport au réel [Sil10] et elle est souvent associée à un qualificatif rapportant à l'espace ou au temps. On peut parler de modèle multi-échelles quand celui-ci est constitué d'entités qui se situent à des niveaux différents le long de l'échelle spatiale (taille des entités impliquées) ou temporelle (temps associé aux comportements de ces entités) [Bae92]. Ces deux échelles permettent d'analyser le phénomène étudié avec une dimension spatiale et une dimension temporelle. Ceci nous conduit à dire que pour mieux appréhender la modélisation des systèmes complexes spatiaux et sociaux il est essentiel de concevoir des modèles multi-échelles permettant à des entités, de nature et de dimensions

diverses, d'interagir à des échelles de temps et d'espace elles aussi très diverses [QGHL10].

Modélisation multi-niveaux

L'aspect "*multi-niveaux*" quant à lui est différent de l'aspect "*multi-échelles*" d'une modélisation dans la mesure où le choix d'un niveau dépend d'un certain nombre de contraintes qui s'imposent au modélisateur telles que [San01] : la disponibilité des données aux différents niveaux de description dans le monde réel, la puissance de calcul impliquée par le nombre d'entités et la période temporelle à simuler. Chaque entité est associée à un niveau selon ses caractéristiques et conformément à des choix de modélisation du concepteur [ME07] qui spécifient les granularités, les abstractions manipulées et les positions des niveaux dans la hiérarchie globale du système [San01]. Ainsi les entités du système réel appartenant à un même niveau (domaine d'abstraction d'un modèle) partagent des caractéristiques communes (comme les dimensions ou le temps d'évolution) qui sont d'un ordre de grandeur identique ou comparable [San01]. L'intégration de plusieurs niveaux répond à un besoin pratique de "zoom" sur des zones critiques [ME07] ainsi qu'à un besoin de structuration et d'organisation d'un système complexe donné [QGHL10] grâce à un emboîtement hiérarchique de niveaux [ME07].

Pour terminer sur la question de la modélisation multi-échelles, on retiendra que le choix des échelles de description et d'observation a un impact sur la manière de représenter le contexte du problème [Bon08]. En particulier, appréhender l'hétérogénéité d'un système complexe requiert la multiplication des échelles de description et leur association dans une construction commune de représentations [PK06]. Même si cette complexification de la perception que l'on a du système augmente le risque d'avoir une représentation globale qui soit illisible ou impraticable il est important de garder la maîtrise sur le processus de description et d'analyse du système de le mettre en rapport avec sa dynamique globale [Bon08]. Dans ce qui suit nous focalisons notre analyse sur la description des modèles et des paradigmes les plus fréquemment utilisés pour modéliser l'évolution des dynamiques spatiales.

1.3 Modèles et paradigmes pour la modélisation des dynamiques spatiales

À l'heure actuelle, les systèmes complexes spatiaux peuvent être modélisés et simulés de beaucoup de façons. Nous distinguons entre deux types de méthodes en l'occurrence les méthodes statiques et les méthodes dynamiques [WQ13]. Les méthodes statiques permettent de rendre compte des changements intervenus sur une période définie. Parmi ces méthodes statiques on peut citer la cartographie qui consiste à établir des représentations des états successifs de l'espace. Elle constitue un des moyens privilégiés pour l'analyse de l'espace à un moment ou une date donnée.

Si les méthodes statiques se limitent à la reproduction de l'état de l'espace à un instant t choisi, l'objectif visé par les approches dynamiques notamment est de reproduire les formes spatiales et de prédire leur évolution [ElG07]. Dans ce sens, les méthodes dynamiques cherchent à décrire l'évolution des propriétés spatiales d'un espace en fonction de paramètres qui font l'objet de négociations entre acteurs et intervenants sur cet espace. Tout au long de cette section, nous allons nous focaliser sur certains modèles utilisés pour la modélisation des dynamiques spatiales.

1.3.1 Modèles mathématiques

La modélisation mathématique des dynamiques spatiales est une pratique qui a fait ses preuves dans beaucoup d'études antérieures [ElG07]. Les modèles mathématiques peuvent considérer la dynamique d'un espace de façon globale, avec ou sans la prise en considération de l'aspect spatialisation. Ceci se fait par la formation des concentrations spatiales urbaines ou à l'inverse étudier en détail la re-dispersion de ces concentrations spatiales ainsi que leurs interactions avec l'espace [PPK06]. Les premiers modèles à base de concepts mathématiques ont cherché au début à tester diverses hypothèses en utilisant la programmation linéaire et le calcul coût/avantage de différents scénarios d'évolution d'un système complexe spatial donné [PPK06] (exemple : modèle la Rand Corporation conçu pour la Philadelphie [Cor61], le modèle de l'ingénieur Jay Forrester [For69]).

Ces premières méthodes se sont heurtées à la complexité des interactions et à la non linéarité des évolutions des systèmes complexes spatiaux. D'où une nouvelle génération de méthodes, est apparue en s'appuyant sur des équations différentielles, qui permettront de simuler la formation des concentrations spatiales ou leur re-dispersion [PPK06]. Ces équations différentielles décrivent le fonctionnement des dynamiques non linéaires du système étudié. Ils permettent d'évaluer les rôles et les effets de différents mécanismes introduits dans l'équation du changement de l'organisation spatiale [GMP⁺96] et dont la résolution débouche sur une situation d'équilibre [SC91].

Un des premiers modèles de base en matière d'analyse mathématique à base d'équations différentielles est le modèle de Miyata et Yamaguchi [MY90] qui est une version adaptée du modèle de P. Allen [AS79] dans le but de gérer ses problèmes socio-économiques de la ville de Hokkaido pour la période (1965-1985). Les équations différentielles non linéaires du modèle, décrivent les variations de deux variables, emploi et population, dans chaque zone de la ville. Le modèle mathématique constitue une continuité du modèle de Miyata et Yamaguchi [MY90] qui décrit la dynamique urbaine de la ville de Marrakech [ElG07] en y introduisant la notion de l'espace.

En revanche, les méthodes à base d'équations différentielles ne permettent pas de combiner un trop grand nombre de facteurs dans une même équation non linéaire sans perdre le contrôle sur les effets possibles de chacun de ces facteurs dans cette combinaison [GMP⁺96]. La prise en compte des interactions spatiales entre les éléments du système restent souvent limitées et relativement simples dans ce type d'équation [ElG07]. D'où l'apparition d'autres types de modèles mathématiques utilisés dans le cadre de la modélisation spatiale. Dans leurs travaux [GBAH04], [Hou06] proposent une classification des modèles mathématiques en :

- Modèles mécanistes : également appelés modèles déterministes, ils ont pour objectif de modéliser des relations causales entre différentes variables d'un système, permettant ainsi de simuler des processus (socio-économiques, physico-chimiques, etc) ;
- Modèles empiriques : un modèle est empirique (ou encore conceptuel) lorsqu'il est construit à partir de connaissances expérimentales ;
- Modèles statistiques : ils peuvent être utilisés indifféremment dans l'une des deux classes de modèles citées précédemment. Mais ils peuvent différer s'ils utilisent des fonctions de tirages aléatoires on parle dès lors de modèles stochastiques ou encore lorsqu'ils sont fondés sur une distribution de probabilités de transition d'un état à un autre telles que les chaînes de Markov [BDS⁺96] ;
- Modèles télémétriques : il s'agit de modèles qui poursuivent un but défini, une situation idéale (réelle ou supposée) tels que les modèles dits d'optimisation en économie ou encore

- les modèles de maximisation de fonctions de buts ou de coût [TLAN01] telle que l'entropie [BTLc00] ;
- Modèles hybrides : ces modèles sont issus du couplage de modèles appartenant aux types précédents. Ce couplage permet de profiter des avantages de plusieurs modèles. Il peut aller d'un simple transfert de données entre deux modèles au fonctionnement autonome, à une intégration plus poussée de modèles imbriqués avec un partage total des données [Eas03], [Hou06].

Plus généralement, ces méthodes mathématiques sont rarement accompagnées d'études théoriques ce qui les rend purement numériques, dans un but essentiellement simulatoire [ElG07]. Ces limites ont incité donc les chercheurs à recourir à d'autres types de modèles comme les modèles à base de systèmes experts.

1.3.2 Modèles à base de systèmes experts et de réseaux de neurones

Un système expert met en œuvre un ensemble de connaissances déclaratives sur les objets sous la forme d'une base de règles et de faits [Fau01]. Ces bases permettent de traiter des connaissances peu structurées comme les connaissances à caractère flou ou heuristique [Hat91]. En effet, la force de ces systèmes à base de connaissances réside dans la séparation entre les connaissances nécessaires pour résoudre un problème et les mécanismes de raisonnement exploitant ces connaissances pour produire de nouvelles connaissances [Hat91]. En plus de ces deux bases le système expert dispose d'un moteur d'inférence qui traite les connaissances du système [Per06]. Ce moteur a pour rôle d'associer des méta-connaissances aux méta-règles traduisant les dispositifs réglementaires [Fau01]. Les règles de production sont très utilisées dans les systèmes de raisonnement [Hat91] étant donné qu'elles contiennent toute l'expertise requise pour le domaine étudié [Fau01].

D'autres systèmes de raisonnement comme les réseaux de neurones fonctionnent grâce au principe de l'apprentissage en s'inspirant de l'architecture neuronale biologique du cerveau humain. En effet, cet apprentissage se fait à partir d'une base d'exemples, puis par assimilation de nouvelles situations à partir de situations déjà apprises. Les informations circulent à travers les neurones connectés appelés aussi centres de calcul et disposés dans une architecture en couches opérant en parallèle [RCG06]. Ces neurones réalisent des transformations (souvent non-linéaires), sur la somme pondérée de la sortie des neurones qui lui sont connectés (neurones d'une même couche ou de couches différentes) [RCG06]. Les réseaux neuronaux sont également fréquemment utilisés pour aborder la question de l'émergence dans les systèmes artificiels car ils permettent bien de réaliser une fonction globale à partir de comportements locaux [CGGG02].

Les systèmes experts et les réseaux de neurones ont souvent été utilisés dans la modélisation des dynamiques spatiales. En effet, les connaissances relatives au système complexe spatial sont bien structurées dans les systèmes experts [Fau01]. Les réseaux de neurones sont aussi efficaces pour reconnaître, apprendre et percevoir des structures spatiales. D'une façon générale, les réseaux neuronaux sont particulièrement performants pour détecter ou représenter des changements qui ne répondent pas à une loi normale ou linéaire.

Parmi les systèmes experts qui traitent de la modélisation spatiale on peut citer le projet SEREBA qui a pour objectif de systématiser l'application de la réglementaire en matière de morphologie urbaine [DT97] [APD88]. Les règles urbaines alimentent la base de connaissances qui structure ainsi les connaissances de l'environnement urbain [Fau01] (îlots, les alignements des emprises publiques, les réseaux routiers, etc). Le but est de déterminer les volumes maximum bâti en se basant sur le règlement urbain de la ville de Liège. Une partition d'objets informés est

ainsi construite [Fau01]. Le système SYGRIPOS [Elm85] constitue aussi un exemple de système expert dont l'objectif est l'assistance à la rédaction de règles d'urbanisme. Il s'agit simplement d'appliquer à travers un ensemble restreint de règles, un raisonnement géométrique déterminant la forme de volumes bâtis [Fau01].

Notons cependant que l'utilisation de telles techniques dans la modélisation des dynamiques spatiales [Bae92], implique la nécessité de gérer les énormes difficultés pour incorporer des connaissances préalables sur le domaine ou les processus de résolution et de gérer les capacités limitées d'interprétation de ce qui se produit au niveau de l'espace considéré. En effet, l'assistance des systèmes experts s'arrête à la simulation des effets d'un ensemble restreint de règles sur l'évolution d'un espace [TDZ08] et restent limités en terme d'interprétation [Hat91]. En revanche, pour les réseaux de neurones l'énorme masse de données à traiter et la phase coûteuse d'apprentissage de ces réseaux de neurones rendent ces outils limités quand il s'agit de traiter des systèmes à caractère complexe [CGGG03]. Ceci explique le recours à de nouveaux mécanismes afin de modéliser les systèmes complexes spatiaux comme les automates cellulaires.

1.3.3 Modèles à base d'automates cellulaires

Dans ce type de modèles à base d'automates cellulaires, l'espace (ou domaine) est représenté sous forme d'une grille de cellules composée par la juxtaposition immédiate de "cellules" triangulaires, carrées ou hexagonales ayant un ensemble d'états discrets et finis [Hou06]. Pour chaque cellule, le changement d'un état à un autre se fait à chaque avancement dans le temps [Sil10] (par exemple : à chaque pas de temps discret). Quand il s'agit de modéliser des dynamiques spatiales, l'état des cellules peut représenter un paramètre relatif à l'espace. Les interactions entre les cellules voisines, résultent de la pratique effectuée sur l'espace [PCGR10b]. Ainsi les états des cellules changent à travers un ensemble de règles de transitions [GMP⁺96] qui prennent en compte à la fois l'état précédent de la cellule concernée à $t-1$ ainsi que celui de ses cellules voisines au temps t [AM97]. Notons que ces règles sont appliquées de la même façon simultanément à toutes les cellules de la grille à chaque unité de temps [OT00]. Ainsi le fonctionnement de l'ensemble des cellules permet de reproduire des phénomènes spatiaux d'auto-reproduction, de diffusion ou encore d'émergence de structures spatiales [Sil10].

Les automates cellulaires constituent donc un outil intéressant pour la simulation des systèmes complexes spatiaux grâce aux règles spatiales formulées à partir de connaissances empiriques sur la dynamique spatiale [dpgl03]. En plus de la visualisation rapide des résultats, la nature "raster" des automates cellulaires facilite le couplage avec les systèmes SIG et rend ces outils encore plus adaptés à la modélisation spatiale [OT00]. Comme exemple de modèles basés sur les automates cellulaires on peut citer le modèle SLEUTH, élaboré par Clarke [CG98], qui a pour but de modéliser la croissance urbaine. Ce modèle a été affiné et étendu dans le cadre du projet Gigapolis ou encore le modèle SPACELLE [dpgl03] basé sur les individus cellulaires en concurrence spatiale. Ce modèle modélise les processus géographiques, par des règles spatiales simples, formulées à partir de connaissances sur la concurrence spatiale. Ce concept de concurrence est introduit au sein de l'automate cellulaire SpaCelle, où chaque individu cellulaire utilise sa force vitale qui varie de sa naissance jusqu'à sa mort pour résister aux forces environnementales résultant des individus voisins (Fig. 1.2).

Malgré une amélioration de la prise en compte du voisinage et du calibrage des modèles par automates cellulaires, il subsiste un inconvénient majeur à ces méthodes. Il est en effet particulièrement difficile de représenter à l'aide des grilles [PCGR10b] certaines caractéristiques importantes des objets spatiaux qui interagissent entre eux de manière complexe, non-linéaire et

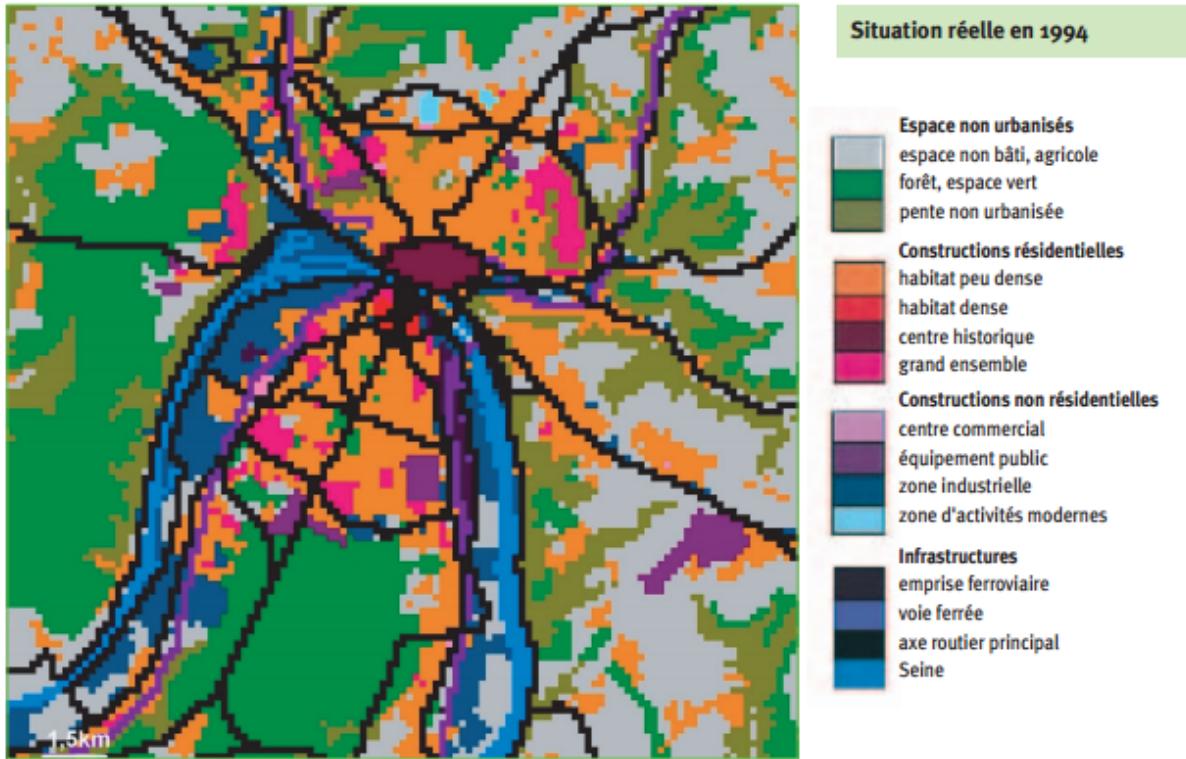


FIGURE 1.2 – L'automate cellulaire SpaCelle [dpgl03]

parfois surprenante [HMWF03] (tels que les réseaux de transports, les rivières, etc). L'approche basée uniquement sur les automates cellulaires atteint des limites techniques lorsqu'il s'agit de [GMP⁺96] simuler des processus de changement à la fois quantitatifs et qualitatifs et de gérer l'évolution de stocks de données de nature différente comme le nombre d'habitants, d'emplois de différentes catégories économiques, etc. D'autres limitations ont été citées par certains auteurs concernant le voisinage [OT00] où il est difficile de prendre en compte l'état des cellules éloignées.

Dans le prolongement de ces travaux, d'autres chercheurs ont eu recourt à d'autres approches pour modéliser les dynamiques spatiales comme les agents cellulaires [JG02], ou les systèmes multi-agents qui feront l'objet de la section suivante.

1.3.4 Modèles orientés agents

Les systèmes multi-agents (SMA), sont définis par [FER95] comme "*constitués d'un ensemble d'agents autonomes et indépendants en interaction, qui coordonnent leurs actions dans un environnement et forment une organisation artificielle*". L'environnement constitue quant à lui l'espace de simulation. Ce dernier "*peut ainsi être un support, c'est-à-dire un simple espace d'évolution pour les agents ; une ressource, l'environnement se caractérise alors par les attributs qui sont à l'origine de l'action des agents ; un champ de communication entre agents*" [FER95]. Pour avoir sa propre dynamique spatiale, l'environnement peut être couplé à un automate cellulaire [Dau02].

Si les interactions entre les cellules des automates cellulaires se font le plus souvent par un ensemble de relations de voisinage spatiales, les interactions entre agents dans un SMA se font par échange de messages. Cet échange de messages peut se faire entre agents ou entre agents

et environnement. L'intérêt majeur du paradigme agent est d'associer à chaque type d'agents, un ensemble de propriétés, de tâches et de règles qui définissent ses interactions avec les autres agents [GMP⁺96]. Comme les agents sont utilisés pour formaliser des composants autonomes ayant des interactions avec les autres agents et une représentation de leur environnement, ils sont naturellement utilisés pour représenter des êtres sociaux en s'appuyant sur des métaphores sociales [SM08].

L'intérêt des SMA pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux se renforce particulièrement quand le phénomène global ne peut être appréhendé complètement sans considérer les formes en émergence (auto-organisation) résultantes des interactions multi-échelles [BG09]. Ainsi dans les modélisations spatiales, l'approche SMA est souvent utilisée pour représenter la mobilité des piétons et/ou des conducteurs dans les villes [HMFB01], [DMPE08], les dynamiques de peuplement de villes [QGHL10] ou encore la localisation de fonctions urbaines dans la ville [SM08].

Parmi ces modèles nous citons le modèle SIMPOPANO [Lou09] basé sur les systèmes multi-agents pour assurer l'aménagement urbain. Le modèle attribue des scores aux quartiers par un ensemble de fonctions capables d'ordonner leurs quartiers par ordre de désirabilité. Toutes les fonctions non résidentielles ont en commun de rechercher une accessibilité maximale, les deux fonctions résidentielles ajoutent en plus leurs possibilités budgétaires. Le modèle encapsule des agents, objets et processus géographiques et peut être exécuté sur des géométries-supports différentes [Lou09]. Un protocole de communication a été utilisé pour formaliser les interactions entre agents [San06].

Dans cette section nous avons fait le tour des méthodes et des paradigmes utilisés pour modéliser les systèmes complexes spatiaux. Nous présentons dans la figure suivante (Fig. 1.3) un comparatif des différents modèles présentés précédemment basé sur certaines caractéristiques qui nous paraissent intéressantes pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux.

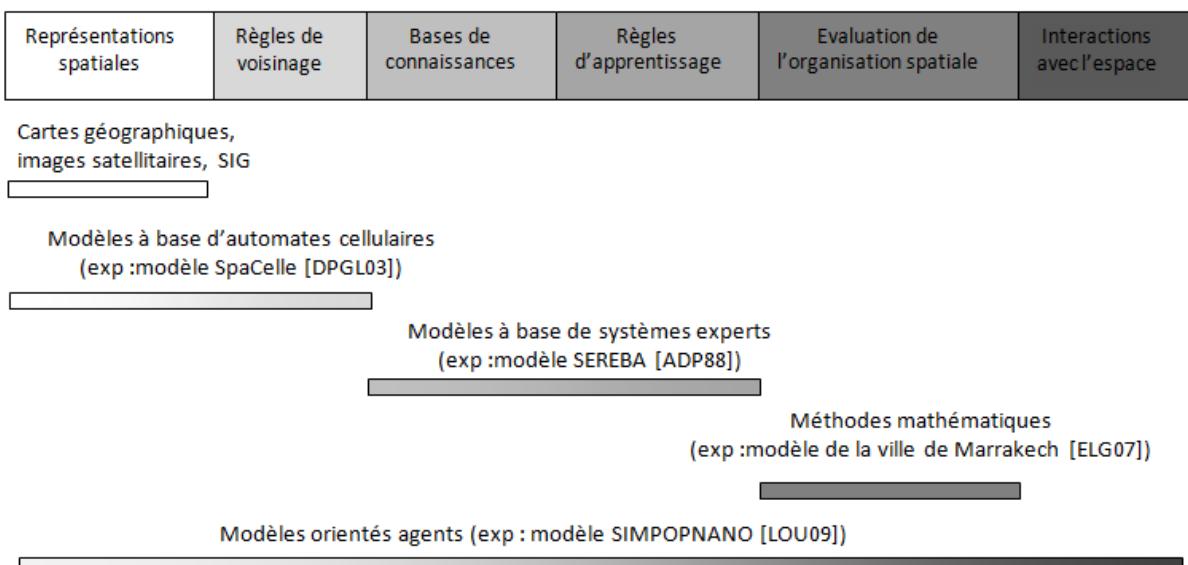


FIGURE 1.3 – Comparatif de paradigmes et de modèles utilisés pour la modélisation des dynamiques spatiales

Ce travail de comparaison (Fig. 1.3) a pour but de nous faciliter le choix du paradigme à adopter en se basant sur ces critères de classement relatifs à notre problématique de modélisation des systèmes complexes spatiaux à savoir les représentations des objets spatiaux, l'adoption des règles de voisinage, l'utilisation des bases de connaissances avec des règles d'apprentissage, l'évaluation de l'organisation spatiale obtenue ainsi que les interactions avec l'espace. On remarque d'après la figure (Fig. 1.3) que seuls les systèmes multi-agents couvrent de façon transversale toutes les caractéristiques des autres paradigmes utilisés pour la modélisation spatiale. Ce qui fait des SMA des outils bien adaptés à la modélisation des dynamiques spatiales. Nous nous focalisons donc dans ce qui suit sur l'utilisation des SMA pour la modélisation des dynamiques spatiales.

1.4 Les SMA dans les phénomènes spatiaux complexes

La montée en puissance des systèmes multi-agents pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux est dûe au fait qu'ils reposent sur les mêmes principes d'auto-organisation et d'émergence et non sur une approche analytique et réductionniste [Sch11]. Ceci se traduit sur le plan informatique par la distribution de la résolution d'un problème entre plusieurs programmes indépendants et autonomes qui interagissent, collaborent et négocient ensemble pour résoudre une tâche ou établir un diagnostic [BJL01]. Ces programmes qui traduisent les savoirs distribués entre plusieurs individus et qui évoluent par échanges d'informations et de connaissances spécifiques sont appelés des "*agents*" [Sch11].

Ainsi, la modélisation multi-agents offre des concepts caractérisés par un haut niveau d'abstraction et une grande malléabilité [Lou09]. Cette modélisation assure donc un bon compromis entre expressivité et simplicité. Nous établirons dans cette section tout d'abord une présentation des propriétés inhérentes au concept d'agent ainsi que des caractéristiques des systèmes multi-agents. Nous verrons ensuite à travers un bref historique des travaux effectués dans les domaines des systèmes complexes spatiaux à base d'agents, les défis auxquels les chercheurs ont eu à faire face dans le domaine de la technologie agent.

1.4.1 Des agents autonomes aux systèmes multi-agents

L'une des premières définitions de l'agent dûe à [Fer97] est "*Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents*". Des propriétés clés ressortent de cette définition telle que la perception, la motricité, la réflexion, l'autonomie, l'action, la réactivité, la rationalité, l'engagement, l'intention, la définition de buts, et la construction de stratégies [BBMW97].

La notion de but constitue pour certains théoriciens la caractéristique qui distingue explicitement l'agent de l'objet. En effet, les agents constituent des entités disposant, en plus des capacités de réaliser un travail à faire, de possibilités de réagir aux évènements qui affectent leurs buts sans pour autant interférer avec les buts d'un autre agent. Ainsi Jacques Ferber [Fer97] précise dans sa définition des agents, qu'un agent est une entité disposant de capacités de spécifier son comportement qui tend à satisfaire ses objectifs, en fonction des compétences et des ressources dont elle dispose, et en tenant compte des communications qu'elle reçoit ainsi que de ses représentations et de sa perception de son environnement.

La théorie des agents [FER95] vise à comprendre la coordination de processus autonomes en concurrence (les agents), pour formaliser dans un premier temps ce que Gasser [BG88] appelle

les aspects macro (sociabilité) des agents : distribution de tâches, interaction et coordination entre agents ainsi que la résolution de conflits par la négociation. Par la suite, la communauté multi-agents s'est penchée sur l'aspect micro de l'agent comme son architecture interne, sa constitution [Mü97] ou ses nombreuses propriétés à savoir l'autonomie, la réactivité, la proactivité, la sociabilité, etc. En plus de ces propriétés, les modélisateurs utilisent l'agent comme un outil conceptuel [Fia01] situé capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement [CdIM01].

Selon Wooldridge et Jennings [WJ95] la construction d'un agent dans un modèle doit passer par trois étapes clés :

- Utiliser un formalisme précis pour définir ce que représente un agent et raisonner sur ses différentes propriétés ;
- Implanter les concepts définis par la théorie de l'agent dans une architecture qui représente le modèle informatique de l'agent ;
- Formaliser un protocole de communication entre agents, qui constitue un langage informatique facilitant la programmation des applications multi-agents.

Il existe différents critères de classement des agents, dont on pourrait citer : la mobilité (statique ou mobile) [AS94] , l'espace de propriétés à exhiber (autonomie, apprentissage, coopération) [NN96] , la fonction de l'agent (interface, traitement), le processus de prise de décision (réactif, cognitif) [Bro91].

L'association de ces agents constitue ce que les théoriciens appellent un système multi-agents [BBMW97]. Ils sont programmés pour agir sur et réagir à leur environnement [AP06a] et aux autres agents, en sous-ensembles pour la résolution distribuée d'un problème et la satisfaction d'un but commun. Plus particulièrement, d'un point de vue déclaratif, un système multi-agents est composé d'un ensemble d'agents, qui évoluent dans un environnement, suivant un protocole d'interactions et une structure organisationnelle explicite ou pas [Bae92].

La dimension temporelle d'un SMA est quant à elle généralement intégrée sous forme d'une horloge qui rythme les interactions entre les divers agents du système et définit dans quel ordre vont être exécutés les agents [BJL01]. Notons que les interactions entre agents dans les SMA suivent des schémas d'interaction particuliers qu'on peut classer en trois grands types d'interactions [BBMW97] :

- Coopération : dans ce type d'interactions les agents travaillent ensemble pour la résolution d'un but commun ;
- Coordination : on parle de relation de coordination entre agents lorsque celle-ci cherche à organiser la résolution d'un problème en exploitant les interactions bénéfiques et en évitant les interactions nuisibles ;
- Négociation : dans une interaction à base de négociation les agents cherchent à parvenir à un accord acceptable pour toutes les parties concernées.

La coordination de l'activité des agents, la hiérarchisation des relations et la synchronisation des échanges entre agents [BBMW97] leur permet de réaliser leurs propres buts ainsi que les buts situés au niveau supérieur puisqu'aucun agent ne possède toutes les compétences requises pour résoudre le problème entier [Jen93]. Ceci dit, les interactions entre agents peuvent entraîner des conflits. Comme chaque agent perçoit son environnement et agit sur celui-ci, donc si deux agents se déplacent et parviennent au même endroit simultanément, il est nécessaire de définir si les deux agents peuvent co-exister au même endroit ou si l'un ou l'autre peut prendre la place [Sie11].

Pour donner corps à ces concepts et aux comportements des entités correspondantes aux modèles d'origine, la modélisation orientée agent se base sur le principe de compréhension mutuelle entre experts du domaine et informaticiens à travers des modèles [PMKP10]. Notons que le manque de spécification peut remettre en cause les résultats de simulation obtenus par le modèle multi-agents [Mic04] [Meu04]. Ainsi pour développer de bons modèles multi-agents, il est essentiel qu'un questionnement général dans une matière soit affiné jusqu'à être réduit à une question précise avant que la conception ne commence [GT00]. Pour cela, le concepteur doit traduire le problème global à résoudre au niveau local des agents [Bae92]. Ceci permet de réduire la complexité du système étudié [Bae92]. La notion de métamodèle est importante aussi dans le domaine de la modélisation multi-agents. En effet, "*un métamodèle multi-agents définit l'ensemble des concepts qui composent un système multi-agents, leurs relations et leurs rôles*" [Sie11].

A partir delà, plusieurs méthodes de conception ont été proposés pour construire un SMA. Si certaines d'entre elles sont centrée-agent d'autre privilégient l'aspect organisationnel du SMA [BHS08]. Dans un premier temps, on va s'intéresser à quelques méthodes de conception des SMA centrée agent à savoir l'approche BDI [Mü96] et l'approche voyelle [FDB97].

Approche BDI

L'idée de base de cette approche proposée par [Mü96] est de décrire l'état interne de l'agent selon trois attitudes mentales de base à savoir : la croyance (Belief), le désir (Desire) et l'intention (Intention). Le choix de chaque attitude mentale se fait conformément à une architecture de contrôle qui sera définie pour chaque agent. En effet, la perception de l'agent de son environnement lui permet de mettre à jour ses croyances qui constituent ses connaissances sur cet environnement. Comme cet agent est muni de désirs qui constituent des buts explicites, ceci lui confère une grande autonomie [Mü96]. En utilisant ses capacités de raisonnement, l'agent devient capable de raisonner sur ses connaissances et ses buts pour en déduire ses intentions qui constituent l'expression des plans d'actions sélectionnés. L'agent met en œuvre ainsi des alternatives d'actions de façon à satisfaire ses buts.

Approche Voyelle

Cette approche incite à penser à la conception du système simultanément en termes de quatre dimensions à savoir : agent, environnement, interaction et organisation [FDB97]. En partant de ce principe, chacune de ces dimensions sera symbolisée par une voyelle distincte [FDB97] :

- A qui constitue l'ensemble d'agents, qui représentent les entités actives du système ;
- E pour désigner un environnement qui constitue un espace disposant généralement d'une métrique ;
- I qui désignent les interactions qui relient les agents entre eux. Ils concernent les infrastructures, les langages et les protocoles d'interaction entre agents ;
- O qui signifie les organisations, qui structurent les agents en groupes, hiérarchies, relations, etc.

Les approches organisationnelles, quant à elles, ont vu le jour grâce à la constatation du critère social des agents qui existent dans le contexte d'un Système multi-agents. Elles se basent sur des concepts de plus haut niveau d'abstraction tel que les groupes, les rôles, les protocoles d'interactions, etc. Nous présentons dans ce qui suit les approches AGR [FGM04], MOISE+ et GAIA qui s'inscrivent dans le cadre de ces démarches organisationnelles.

Approche AGR

Dans leurs travaux [FGM04] ont présenté un métamodèle générique appelé AALAADIN pour décrire une organisation qui s'articule autour de trois notions : agent, groupe, et rôle. En effet, comme pour toutes les autres approches *l'Agent* représente une entité capable de communiquer et d'agir en jouant un ou plusieurs rôles dans un ou plusieurs groupes. Le concept de *Rôle* signifie une représentation abstraite de la fonction d'un agent au sein d'un ensemble d'agents qui partagent des caractéristiques appelé *Groupe*. AGR [FGM04] a été étendue par l'approche AGRE [FB05] qui intègre les aspects sociaux et physiques des agents. Ainsi dans AGRE, les agents possèdent un ensemble de corps considérés comme des interfaces sociales qui agissent dans l'environnement.

Approche MOISE+

Cette approche développée par [HSB02] s'appuie sur une spécification structurelle (structure du SMA) et une spécification fonctionnelle (buts à atteindre). Elle se base sur trois concepts principaux, rôles, relations entre rôles, et groupes qui permettent de structurer un SMA en trois niveaux : individuel, social et collectif. Dans le niveau individuel, chaque agent dispose d'un ensemble de comportements qu'il doit avoir lorsqu'il joue un rôle spécifique. Le niveau social permet de spécifier les relations entre les rôles spécifiés. Finalement, l'agrégation de rôles dans des structures (sous groupes) fera l'objet du dernier niveau collectif [HSB02].

Méthode GAIA

La méthode GAIA (Graphical Analysis for Interactive Assistance) développée par [WJK00] apparaît pour compléter des notions propres aux objets afin de les appliquer aux agents. Cette structure organisationnelle du Système se base sur des concepts abstraits (rôle, responsabilité, protocole, activité, et d'interaction), aboutissant progressivement vers des concepts concrets (modèle d'agent, le modèle de service, le modèle d'accointance, etc). Ces modèles seront utilisés dans deux phases distinctes : la phase d'analyse dont l'objectif est de comprendre la structure du système sans faire référence au détail de l'implémentation et la phase de conception qui correspond au niveau concret qui permet de spécifier les types d'agents et les services qui lui sont associés [WJK00].

En adoptant une approche centrée agent, il s'avère souvent difficile de prévoir le comportement global du système en se basant sur les comportements individuels des agents [BHS08]. D'autant plus que la possibilité de communication entre tous les agents sans contrôle global affaiblit la sécurité des applications agents développer. Pour cela l'approche organisationnelle est apparue pour remédier entre autres à certains de ces problèmes en diminuant le nombre d'interactions entre les agents grâce aux contraintes d'interactions imposées dans les structures sociales, et en réduisant également l'interdépendance entre les composants hétérogènes avec l'introduction de concepts d'abstraction de haut niveau [BHS08]. Ainsi en diminuant le nombre d'interaction et l'interdépendance entre les composants, l'approche organisationnelle permet à la fois de diminuer la complexité de la conception des systèmes SMA et la complexité du système étudié [BHS08]. Ce qui fait des approches SMA en général un outil intéressant pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux. On détaillera davantage cet aspect dans la section suivante.

1.4.2 Le paradigme multi-agents dans la modélisation de la complexité spatiale

On parle de modélisation spatiale dès lors qu'il s'agit d'étudier l'effet de certaines dynamiques sur la structure de l'espace étudié [BG99b] sous forme cartographique (approche descriptive) ou même de trouver les causalités derrière la vitesse et la forme des évolutions observées (approche explicative) [San01]. Les méthodes de simulation de type SMA (Simulation multi-agents) assurent donc ce passage de la description des objets géographiques à la simulation de leurs interactions et la formalisation des hypothèses [BG99b]. Dans leurs travaux [BG99b] distinguent deux approches de modélisation orientées agent des dynamiques spatiales : les approches "spatiales" et les approches "acteurs".

Pour [Sil10], dans le cas de l'approche acteur, l'agencement de l'espace dépend de choix successifs d'un ensemble d'acteurs qui tendent à répondre au besoin de la maîtrise de l'espace et des facteurs d'organisation selon une logique de gouvernance [Sil10]. Ces acteurs peuvent collaborer ensemble lors de l'intervention sur une opération en partageant par exemple des documents extrêmement variés dans leur contenu ou support [TDZ08]. Cette collaboration peut amener souvent à des conflits. Dans une telle situation, les acteurs vont devoir négocier pour trouver un compromis ménageant au mieux les intérêts des différents groupes impliqués [TDZ08].

Cependant, les acteurs ont une perception limitée de leur environnement à la différence de l'approche spatiale où les entités spatiales connaissent toutes leurs composantes (avec leur emplacement et leurs qualités) [BG99b]. Les réflexions suscitées par la comparaison des deux approches permettent de stipuler que si dans la première approche à base d'acteurs la part d'aléatoire est plus grande, la deuxième catégorie de résolution spatiale dispose d'une plus grande capacité à trouver des solutions aux problématiques posées aux agents.

De ce fait, pour trouver une bonne correspondance entre les deux approches, les modélisateurs vont vers la conception d'acteurs ayant une plus grande connaissance de l'espace dans lequel ils évoluent, ou vers des entités spatiales ayant une plus grande diversité dans leurs natures respectives, avec plus d'agents, d'interactions et d'aléatoire [BG99b].

Nous nous intéressons dans ce qui suit aux approches dites spatiales qui offrent plus de fiabilité et de capacités pour la résolution de problèmes spatialisés. Dans ses travaux [FDB97] définit un Problème Spatialisé (PS) par :

- Une Carte C, espace métrique de référence spatiale ;
- Un ensemble de Valeurs V, qui constitue les attributs des points de l'espace ;
- Un Environnement E, le Paysage sur tout C, qui à tout point de l'espace associe des attributs parmi les Valeurs possibles ;
- Les Descripteurs D, regroupant les attributs de la solution ;
- Un système noté M de Contraintes Internes, défini par un prédictat opérant sur l'ensemble des Formes (on appelle forme toute description sur C) ;
- Un système noté T de Contraintes Externes, défini par un prédictat opérant sur l'ensemble des couples (Paysage, Forme) localisés sur C.

La solution finale d'un problème de type PS [FDB98] consiste à définir les attributs attachés à chaque point appelés "les Descripteurs" tout en vérifiant les contraintes morphologiques de forme intrinsèque et topologiques c'est à dire relatives à l'environnement (dites aussi Internes et Externes) [FDB97]. Les prédictats de ces contraintes peuvent être valués pour permettre de quantifier la proximité d'une Description à la Solution recherchée [FDB97]. Formellement, pour pouvoir aborder tout problème "spatialisable" de l'intelligence artificielle, il est nécessaire

d'accepter un ensemble d'espaces métriques quelconques dans C [NS71]. Cette résolution peut devenir dynamique puisque la Carte C peut inclure la dimension temporelle tout en gardant les contraintes fixes dans le temps. Ainsi dans les problèmes spatiaux la solution s'adapte pour suivre l'évolution de l'environnement.

L'originalité de cette approche introduite par [Dem91] se situe dans le fait que l'agent contrôle lui-même ses trois champs : champ de communication (ses interactions avec les autres agents), son champ de perception (ses interactions avec son environnement) et son champ d'action (ses déplacements dans l'environnement). Comme exemple de modèle basé sur l'approche PS, nous pouvons citer le modèle SMARRPS qui a été développé dans le prolongement de PACO (pour "Cooperative Pattern") initialement développé par Demazeau [Dem91]. Ce modèle réunit l'utilisation des Systèmes multi-agents Réactifs (SMAR) dans un contexte de résolution de type PS.

D'un autre côté, d'autres travaux de la modélisation spatiale optent plutôt pour les agents cognitifs [Sil10]. Ces agents cognitifs peuvent représenter des entités spatiales (de toutes sortes de fonctions), des groupes d'entités et la commune toute entière. Pour ce type d'agents les décisions prises sont motivées par des buts précis. Ces buts dépendent étroitement de la perception de l'agent et de sa représentation logique de son environnement [Sil10].

Ces agents basés sur une architecture BDI [RG95] agissent en fonction de trois composantes : croyances, désirs et intentions. Dans cette catégorie de modèles nous pouvons citer le prototype de simulation de la morphogenèse urbaine [Sil10]. Dans ce modèle [Sil10] les croyances des agents sont issues de sa perception de son environnement, leurs désirs (agents bâtiments) est de maximiser leur degré de satisfaction par rapport à leur localisation dans l'espace, leurs intentions sont liées à leurs règles comportementales (comportement définis par les architectes des agents bâtiment, commune et groupe d'habitat). Ceci dit, en plus de ces règles les agents décisionnels doivent pouvoir évoluer en étant capables d'apprendre, d'influencer d'autres agents et d'évaluer leurs propres décisions en activant des réseaux neuronaux [Sch11].

Cette dynamique des agents décisionnels se base à la fois sur un régime de croyances, d'intentions, de désirs et sur un ensemble de contraintes sociales, institutionnelles et normatives de la société dans laquelle ils évoluent [Sch11]. D'autres travaux abordent la modélisation des dynamiques spatiales par l'utilisation d'agents cellulaires, combinant agents avec automates cellulaires dont on pourrait citer le modèle UrbanLab [CGM06]. Ce modèle se base sur les agents cellulaires. Un agent cellulaire occupe une position dans la grille de cellules et a un objectif à remplir à caractère spatial [Sil10]. Dans cette configuration, la distance entre les cellules va influencer les interactions entre agents [Ber01]. Le résultat de la simulation est une visualisation 3D modifiable en fonction des feedbacks des personnes consultées.

Quand il s'agit d'un système spatial complexe, on note également que la modélisation multi-agents permet de saisir la complexité des phénomènes étudiés [Sie11]. La vision basée sur l'entité agent offre un puissant répertoire d'outils, de techniques, et de métaphores qui ont le potentiel d'améliorer considérablement l'étude des systèmes complexes. En effet, la dynamique globale du système multi-agents émerge des interactions au niveau local entre les différents agents [HRR98]. Ceci confirme donc que *"la définition d'un système complexe et celle d'un système multi-agents sont très proches. Mais au delà de leur seule ressemblance, systèmes multi-agents et systèmes complexes désignent en fait la même chose"* [BBMW97].

Ainsi la conception de simulations multi-agents appliquées aux systèmes complexes spatiaux offre une souplesse plus grande pour gérer les interactions entre les objets de différents niveaux du système complexe [San01]. Ce type de modélisation semble être plus intuitif que les approches

traditionnelles car le concepteur se place à un haut niveau d'abstraction [MGG05]. L'approche multi-agents décompose ainsi la dynamique d'un phénomène donné en plusieurs niveaux d'abstraction : le niveau microscopique des agents et le niveau macroscopique du système multi-agents représentant la dynamique globale qui résulte des interactions entre toutes ces parties et leur environnement. Cet aspect multi-échelles peut être également observé lors de l'encapsulation d'un environnement au sein d'un agent, lui-même situé dans un autre environnement encapsulé par un autre agent et ainsi de suite.

Ce type de programmation émergente est souvent abordé concrètement par un système multi-agent adaptatif, basé sur les mécanismes d'auto-organisation coopératifs décrits par la théorie AMAS (Adaptive Multi-Agent System) [Geo04]. Ces mécanismes permettent aux agents de progresser vers une organisation à atteindre, sans pour autant la connaître d'avance [Geo04]. L'émergence de la fonction du système est produite par l'organisation entre les agents qui sont programmés pour être en situation coopérative avec les autres agents du système [Geo04]. Cela se traduit par le fait qu'à tout instant, un agent peut localement décider s'il est en situation coopérative dans le cas où il reçoit des informations pertinentes pour réaliser sa fonction et qu'il transmet des informations utiles à d'autres [Geo04]. Par ailleurs, ces agents peuvent communiquer soit directement par envoi de messages soit indirectement par l'environnement [Geo04].

Dans la section suivante nous nous intéressons à l'utilisation des agents dans les sciences sociales et urbaines étant donné que notre cas d'étude porte sur la modélisation des systèmes urbains.

1.4.3 Les SMA, les sciences sociales et les dynamiques urbaines

Les modèles multi-agents peuvent s'avérer d'une grande valeur en sciences sociales, et leur potentiel commence à peine à être reconnu [AP06a]. Ces modèles sont particulièrement adaptés à la simulation de phénomènes sociaux intrinsèquement complexes et dynamiques [AP06a]. De ce fait, la théorie des univers multi-agents constitue souvent l'approche de choix en simulation des phénomènes sociaux [Len94], [Hav94], où l'individu singulier est considéré comme l'unité élémentaire [WB71]. Plusieurs chercheurs considèrent même que les modèles orientés agents se sont largement inspirés des concepts des sciences sociales qui leur ont donné naissance [Lou09].

En effet, dans ces modèles il peut y avoir une correspondance directe entre les agents et les individus (ou les organisations, ou encore les acteurs) qui existent dans le monde social réel. Les interactions entre agents peuvent de la même manière correspondre aux interactions entre les acteurs du monde réel [AP06a]. Avec un tel modèle, il est possible d'initialiser le monde virtuel à un état préétabli, de laisser le modèle s'exécuter et d'observer son comportement [AP06a]. Ce qui les place dans la catégorie des sciences cognitives, sociales et naturelles qui ont tendance à modéliser des phénomènes naturels à travers les concepts d'auto-organisation [PMKP10]. Ces modèles sont également aptes à démontrer l'émergence d'institutions sociales à partir d'actions individuelles, qui peuvent apparaître en observant la simulation [AP06a].

L'intersection individu-espace et l'intersection individu-société offertes par les SMA facilitent la modélisation des dynamiques urbaines qui intègrent une très forte composante spatiale et sociale [BJL01]. Selon plusieurs approches la ville est considérée comme un assemblage social et spatial qui se crée à partir des interactions répétées entre individus. Dès lors les dynamiques urbaines constituent un des meilleurs domaines où cette caractéristique d'auto-organisation émergente observée dans les systèmes multi-agents peut être particulièrement efficace [BG09]. Les agents décisionnels basés sur des règles de "croyance-désir-intention" (Belief-Desire-Intention Agents) se prêtent particulièrement bien selon DeLanda [DeL06] à la modélisation des phéno-

mènes d'émergence urbaine. En effet, les agents qui constituent ces systèmes sont capables d'évaluer leurs propres décisions et d'influencer d'autres agents, et, en se basant sur leurs croyances et désirs. Notons que les comportements des agents doivent prendre en considération les contraintes sociales, institutionnelles et normatives de la société dans laquelle ils évoluent.

Les systèmes multi-agents constituent donc un paradigme bien adapté à la modélisation urbaine [GMP⁺96]. Les SMA ont été utilisés en géographie urbaine pour simuler des processus de diffusion [Dau02] de flux de population [MB98], d'organisations socio-spatiales pour la gestion concertée en environnement d'évolutions paysagères [PM00], et d'émergence de structures urbaines [SM08]. Par exemple, SWARM Intelligence [GBD09] constitue un des modèles qui illustre le mieux l'émergence des organisations spatiales. En effet, ce modèle combine la prise en compte des organisations émergentes en respectant les contraintes spatiales. Il se base sur les effets de rétroaction des organisations émergentes sur les constituants du système et de son environnement. Il s'agit d'un processus d'auto-organisation multi-critères [GBD09] où apparaît une nouvelle population émergente à l'intérieur des zones urbaines ou territoriales en fonction d'un ensemble de critères. Cette nouvelle population attirée tout d'abord par certains critères d'attraction, apporte de nouvelles caractéristiques au système urbain qui sont capables elles-mêmes de modifier l'environnement. Les algorithmes de SWARM Intelligence [GBD09] qui décrivent les processus d'émergence et de rétroaction sont inspirés des théories des colonies de fourmis (concept de la phéromone, formation des clusters, etc) et sont implémentés de façon décentralisée dans plusieurs centres (Fig. 1.4).

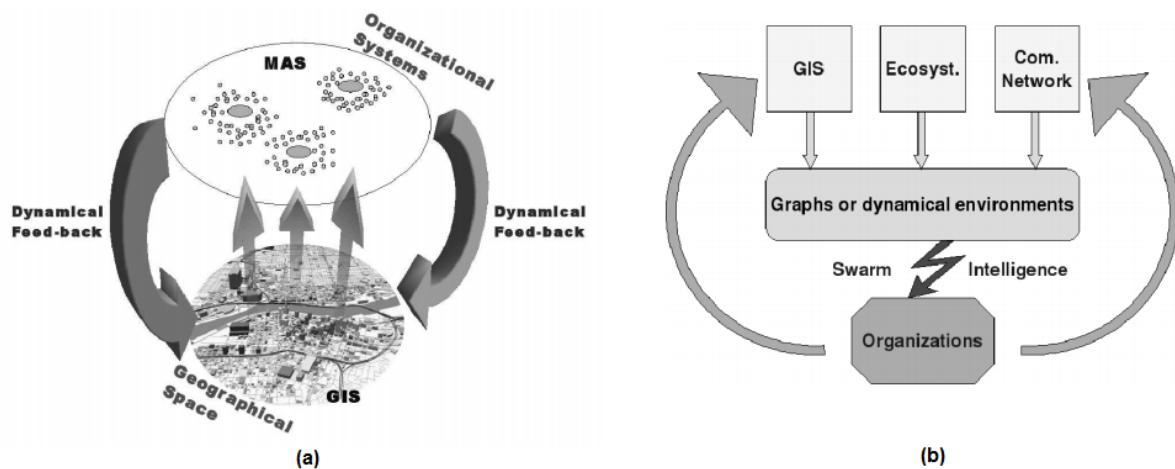


FIGURE 1.4 – (a) Complexité de l'espace géographique par rapport aux organisations émergentes (b) Modélisation de la détection de l'organisation sur les environnements dynamiques en utilisant SWARM Intelligence [GBD09]

Ce court exposé sur l'utilisation des SMA dans le domaine de la modélisation spatiale nous permet de conclure que l'approche orientée agent a fait ses preuves dans la gestion de situations complexes [FER95], [AP06a], à différentes échelles et niveaux d'abstraction. Ce qui explique les raisons du succès de ce paradigme dans ce domaine et nous permet de saisir les possibilités qu'il offre pour notre approche de modélisation des systèmes complexes spatiaux.

1.5 Positionnement et critiques

Pour conclure, nous pourrons dire que plusieurs théories, paradigmes, modèles et outils de spécification formelle [AP06a] permettent d'étudier le système complexe spatial comme une unité globale formée d'interconnexions entre éléments, actions ou individus qui évoluent sur un même environnement [Mor90]. Dans ce chapitre nous avons défini les concepts de base qui font l'objet de notre travail de recherche. Nous avons introduit la notion de complexité des systèmes comme étant une propriété qui caractérise les systèmes ayant des entités en interrelation dont la dynamique émergente permet de comprendre le fonctionnement global du système. Par la suite, comme nous travaillons sur une approche de modélisation des systèmes complexes dans le domaine spatial, nous nous sommes penchés sur les spécificités des systèmes complexes spatiaux.

Nous avons également fait le tour des modèles qui ont traité la problématique de la modélisation spatiale dans le but de déterminer les techniques et les paradigmes les plus appropriés pour notre approche de modélisation des systèmes complexes spatiaux. Nous nous sommes penchés particulièrement sur l'utilisation des SMA dans les traitements complexes des informations spatiales. En effet, suite à cette analyse nous constatons que les systèmes multi-agents représentent un outil prometteur pour modéliser des dynamiques spatiales complexes [BG99b]. Ceci revient au fait qu'ils offrent une riche boîte à outils de formalisation systémique, décentralisée, adaptée et puissante en matière de stratégies et de représentations individuelles avec des capacités à aborder des questions complexes de modélisation en particulier celles inhérentes aux dynamiques spatiales.

Nous nous focaliserons dans le chapitre suivant sur un système complexe spatial particulier à savoir la ville. De part l'intérêt que peut constituer la ville pour notre travail qui porte sur la modélisation spatiale, nous mettons l'accent sur les spécificités du système urbain étant donné qu'il s'agit du notre cas d'études choisi dans le cadre de cette thèse.

Chapitre 2

La ville comme un système complexe spatial, social, émergent et multi-échelles

Sommaire

2.1	Introduction	25
2.2	La complexité des systèmes urbains	26
2.2.1	Le milieu urbain, un organisme vivant complexe qui s'auto-organise	26
2.2.2	Les échelles de la ville	28
2.3	Des approches de planification pour comprendre le système urbain	28
2.3.1	L'analyse multi-critères de décision (AMCD)	28
2.3.2	La prospective	29
2.4	Des outils d'aide à la décision pour la planification urbaine	30
2.5	Composants et modèles du système urbain	33
2.5.1	La dynamique démographique	34
2.5.2	La dynamique économique	37
2.5.3	La dynamique de la mobilité urbaine	39
2.5.4	La dynamique d'occupation du sol	41
2.6	Intégrer des processus pour étudier une question spatiale complexe	44
2.7	Positionnement et critiques	47

2.1 Introduction

Après avoir présenté les systèmes complexes spatiaux, nous nous intéressons dans ce chapitre à la ville qui constitue notre cas d'étude pour comprendre ses caractéristiques et déterminer ses composantes. La gouvernance ou le pilotage d'une ville est une activité qui cherche à déterminer son évolution dans le futur en prenant en considération les relations de partenariat ou de conflit entre les différents acteurs [Lau94]. Ce type d'activité échappe très souvent aux volontés de planification prévues au préalable [AP06a] par les politiques interventionnistes sur l'espace urbain [Sch11]. Dans cette optique, nous présentons dans ce chapitre les approches, les modèles

et les outils d'aide à la décision utilisés par les urbanistes lors de la conception des villes afin de comprendre leurs caractéristiques et leur mode de fonctionnement.

Étant donné qu'il est souvent difficile de mettre toutes les spécificités des systèmes urbains dans un seul modèle, nous nous intéressons aux modèles qui représentent chacun une dynamique différente de la ville. Ainsi nous consacrons la dernière partie de ce chapitre à l'exposition d'une panoplie de modèles qui permettent de représenter les activités économiques, les évolutions démographiques, les changements des tissus parcellaires et les innovations en matière de transports urbains qui gouvernent la ville. Nous cherchons par là à connaître leurs spécificités et identifier les éléments communs entre eux [PPK06]. On s'intéresse par la suite à l'intégration des modèles dans les systèmes SMA afin d'étudier la façon avec laquelle les modélisateurs introduisent les modèles pour avoir une vue globale sur un système donné.

2.2 La complexité des systèmes urbains

La ville est devenue un objet d'étude primordial pour les chercheurs en urbanisme. Cet intérêt pour la gestion urbaine se justifie par le fait que les villes sont le centre de nombreux enjeux qui touchent ses habitants comme les enjeux sociaux, économiques, et écologiques [Sil10]. Dans cette section, nous allons définir le système urbain (ou la ville) en mettant l'accent sur le caractère complexe et émergent de ce système. Nous expliciterons la notion de des échelles au sein de la ville qui constitue un bon exemple de système complexe spatial multi-échelles pour illustrer toutes les notions présentées dans les sections précédentes.

2.2.1 Le milieu urbain, un organisme vivant complexe qui s'auto-organise

La définition de la ville varie selon plusieurs points de vue : d'un point de vue fonctionnel, la ville est un regroupement durable, dynamique dans un espace et un milieu d'habitat de population humaine [ElG07]. Du point de vue conceptuel, la ville peut être vue comme un produit social dont la dynamique résulte de l'interaction de plusieurs processus interdépendants : démographiques (la croissance naturelle), migratoires, économiques (création et localisation des emplois), d'expansion territoriale, et de mobilité [VD02]. Dans ses travaux, [CGM06] définit la ville comme *"le lieu institué d'un vivre ensemble qui lie la pluralité des communautés particulières, qui fait accéder les mondes vécus à une visibilité politique et qui maintenant les lieux communs dans leurs intervalles et leurs connexions"*.

En parlant de la ville l'écrivain Steven Johnson [Joh01] la qualifie d'interface d'échanges et de navigation informationnelle dont l'efficacité est renforcée par la formation de clusters cohérents. Il s'agit donc d'une des formes spatiales possibles de regroupement des habitants en noyaux résidentiels [ElG07] concentrant la plupart des activités humaines [Pau09] : habitat, commerce, industrie, etc. Nous explicitons dans ce qui suit les caractéristiques d'auto-organisation et d'émergence qui contribuent dans la complexité de la ville. Pour justifier le caractère complexe de la ville, ces chercheurs [WQ13] évoquent les caractéristiques suivantes : les interactions entre une multitude d'éléments (matériels et non matériels), les boucles de rétroaction (entre les éléments de la ville), l'adaptativité (comportement adaptatif de la population), l'émergence de propriétés en plusieurs couches, l'ouverture, la dynamicité, la non-linéarité et l'auto-organisation, etc. Nous nous concentrerons dans ce qui suit sur les propriétés de l'auto-organisation et de l'émergence qui justifient le caractère complexe de la ville.

Auto-organisation et émergence

Pour mieux comprendre et modéliser la ville, la théorie des systèmes complexes auto-organisés constitue un outil efficace pour la prise de décision d'aménagement [Sch11] permettant d'intégrer des compétences interdisciplinaires [Sil10] et de maîtriser l'évolution de la ville [Sil10]. Notons que c'est cette propriété d'auto-organisation du système complexe urbain qui provoque l'émergence de nouvelles propriétés à un niveau supérieur [Sch11]. Les villes sont en général une illustration évidente du concept d'émergence [ElG07] dans la mesure où les interactions humaines et organisationnelles entre les différentes composantes de la ville se déroulent à plusieurs niveaux, allant de l'échelle locale à l'échelle globale, et dont les résultats peuvent donner lieu à des phénomènes émergents à un niveau supérieur d'observation [Sil10].

Ces propriétés émergentes font que [Sil10] "*le milieu urbain comme bien des organismes vivants, s'auto-transforme*". On peut trouver ce types d'interactions entre les trottoirs qui constituent une sorte de phéromone des citadins et les quartiers où peuvent émerger des propriétés supérieures comme [Sch11] : sécurité, équilibre, spécialité, composition sociale, etc. Les boucles de retroaction de ces structures hiérarchiques sont également essentielles à apprécier pour la compréhension de l'évolution de ces systèmes lors de l'établissement de notre approche de modélisation multi-échelles des systèmes complexes spatiaux, et notamment la ville.

Complexité de la ville

De nombreux chercheurs ont discuté de la complexité des villes et des systèmes urbains de différents points de vue [WQ13]. Quand on reprend une des définitions énoncées dans la section (cf. section 1.2.1 page 4), on trouve qu'un système est dit complexe lorsqu'il est constitué d'un grand nombre d'entités en interaction produisant des phénomènes émergents qui peuvent conduire à des scénarios d'évolution imprévisibles [Pog10].

Ainsi transposée aux systèmes urbains, la théorie des systèmes complexes suggère [Qui07] qu'il ne serait pas possible de les décrire, comme des systèmes simples, au moyen d'une fonction à optimiser dans une finalité politique ou économique explicite, mais plutôt comme des systèmes à complexité organisée [Sch11]. Ceci explique l'écho quasi-immédiat qu'ont eu les théories inhérentes aux systèmes complexes dans le domaine de l'urbanisme [Sch11]. Ces théories apportent un cadre conceptuel et scientifique pour la modélisation de la complexité urbaine [AP06a] ainsi que le développement des applications informatiques permettant de construire une théorie géographique des villes totalement nouvelle [BP10].

L'architecture multi-couches de la ville constitue également une des formes de complexité des villes [WQ13]. Ces couches peuvent inclure les personnes, les familles, les voisins, les rues, les communautés, les districts qui constituent des sous-systèmes. Plus le système est structuré en couches plus sa complexité augmente. Finalement, la ville peut être vue comme un grand système où chaque couche, chaque sous-système et chaque connexion constituent une dimension à part entière.

Comme réponse à ce manque de visibilité par rapport à l'évolution des villes, les urbanistes ont inventé le concept de projet urbain [Fau01] qui se présente comme une planification stratégique de la composition urbaine intégrant les objectifs politiques ainsi qu'une combinaison complexe de contraintes de toutes sortes (i.e. les échelles spatiale et temporelle) inhérentes à la ville. L'aspect multi-échelles ainsi considéré est analysable selon trois axes de compréhension [ElG07] : social, espace, temps. Ces axes se déclinent eux-même en trois échelles : temporelles, spatiales et décisionnelles [AGG⁺01]. Nous nous intéressons donc dans la section suivante plus particulièrement à ces trois échelles de la ville.

2.2.2 Les échelles de la ville

Pour comprendre l'évolution de la ville, il est souvent nécessaire de considérer trois axes de compréhension [AGG⁺01]. Au cours du temps, les trois dimensions (spatiale, temporelle et décisionnelle) de la ville s'inter-influencent de manière dynamique grâce à une articulation entre individus, espace et société afin de définir l'effet des règles définies au niveau individuel ou au niveau collectif sur la réification de l'espace et vice versa [AGG⁺01]. Le choix de l'échelle temporelle ou spatiale ou décisionnelle dépend généralement de l'usage qui sera fait du modèle [AGG⁺01]. Ce qui intéresse particulièrement les urbanistes dans cette modélisation multi-échelles et ces interdépendances entre leurs différents niveaux d'organisation (ville, quartiers, îlots, etc) [Sil10] intégrées dans le modèle, est de pouvoir tester différentes hypothèses d'aménagement avant de passer au monde réel [Pum06b], [Pum06a].

Le but est de comprendre comment le système complexe que constitue la métropole va réagir à l'introduction d'un programme de réaménagement urbain [Sil10]. Il s'avère donc encore plus nécessaire qu'ailleurs, dans notre démarche de modélisation des systèmes complexes spatiaux et en particulier des systèmes urbains, de préciser des niveaux d'observation, les emboitements et les interférences de phénomènes opérant à différentes échelles [AP06a]. Ceci sous-entend que les outils de modélisation vont étroitement dépendre des choix temporels, spatiaux et décisionnels qui font partie intégrante des modèles à développer pour étudier un phénomène spatial donné [AP06a].

Ces outils de modélisation dépendent également des choix décisionnels allant des décisions plus simples aux plus complexes [AGG⁺01]. Quand la décision humaine est simple seules des variables biophysiques interviennent dans l'évolution du système. Plus l'entité de décision tient compte des décisions d'autres entités et des impacts de leurs décisions sur l'environnement dans lequel ils vivent plus le nombre de variables et d'acteurs intervenants va augmenter.

Cette prise de décision est formalisée désormais dans des approches longtemps utilisées par les urbanistes lors de la modélisation des systèmes urbains. Nous présentons dans ce qui suit les deux principales approches pour la prise de décision dans la planification urbaine à savoir : l'analyse multi-critères de décision et l'analyse prospective.

2.3 Des approches de planification pour comprendre le système urbain

L'activité de planification constitue une pratique qui a pour but de gérer l'expansion et la prospérité de la ville [All04]. Il existe beaucoup d'approches dans la gestion territoriale qui permettent aujourd'hui de mieux comprendre les dynamiques urbaines complexes [PPK06]. Ces approches cherchent généralement à orienter les politiques de développement et d'aménagement des villes [All04]. On se focalise ici sur deux familles d'approches : l'analyse multi-critères et l'analyse prospective.

2.3.1 L'analyse multi-critères de décision (AMCD)

L'analyse multi-critères offre un domaine de résolution qui tient compte d'un ensemble de critères susceptibles d'influencer la décision. Le critère constitue un facteur à prendre en considération pour évaluer un scénario donné ou pour apprécier une décision d'action [Laa00] ; [HJ97]. Les méthodes d'analyse multi-critères de décision (AMCD) sont basées sur le principe de la

comparaison de scénarios d'actions [Roy85] en fonction de variantes en vue d'aboutir à des compromis acceptables [SIM90]. L'analyse multi-critères consiste à faire un :

- Choix, en utilisant une procédure de sélection (par exemple : faire le choix entre un projet de bibliothèque, un centre sportif, un parc et une piste cyclable) ;
- Tri, grâce à une procédure d'affectation d'indices (par exemple trier les zones vertes par indice de verdure pour sélectionner ceux qui seraient propices à l'établissement d'un élevage d'animaux) ou par classes de priorité (par exemple classer divers scénarios d'intervention du moins intéressant plus intéressant) ;
- Description, pour améliorer la compréhension d'un ensemble de différentes actions et les conséquences possibles des interventions [Pre03].

L'analyse multi-critères de décision (AMCD) a souvent été utilisée dans l'étude des dynamiques urbaines, dans la mesure où les acteurs territoriaux sont impliqués dans le processus d'aménagement avec des préférences et des attentes différentes, par la comparaison des conséquences des interventions proposées. L'analyse multi-critères de décision permet donc de simplifier la négociation entre les acteurs impliqués dans le processus décisionnel [Pre03] tout en prenant en considération les contraintes du milieu (prises par exemple du système d'information géographique de la ville).

Ainsi, l'aménagement du sol qui se base sur l'approche d'analyse multi-critères de décision (AMCD) permet de prendre en considération les aspirations des parties modélisées sous forme de critères choisis et pondérés par ces derniers pour en choisir les scénarios d'aménagement les plus appropriés au contexte socio-économique du système urbain [Laa00], [Pre03]. Dans ce qui suit nous présentons une autre catégorie de méthodes qui a fait ses preuves également dans le domaine de la planification urbaine à savoir les méthodes de prospective.

2.3.2 La prospective

La prospective quant à elle permet d'avoir "*un regard sur l'avenir destiné à éclairer l'action présente*" [Hat93]. Il ne s'agit pas de prédire l'avenir, mais de donner un panel de représentations plausibles et cohérentes du futur en se basant sur certaines hypothèses [Hou06]. La prospective se base également sur l'étude des tendances du passé qui constituent un "*support à la réflexion*" [Mas65] pour les acteurs chargés de comprendre les dynamiques urbaines, leur permettant d'en nuancer les influences [Moi06]. Ce passé constitue en quelque sorte le réservoir d'information par auquel ils se réfèrent afin de mener à bien leurs politiques [AP06a]. Ainsi, la prise en compte des événements passés explique la dynamique du système et par conséquent son état actuel [AP06a]. Ainsi, dans la dynamique urbaine, la prospective a été souvent utilisée pour comprendre quels étaient les futurs possibles de l'espace de vie des habitants de la ville et les impacts des scénarios proposés [Hou06] sur le plan socio-économique, environnemental ou encore climatique, etc.

En partant de cette définition, on se focalisera sur les outils prospectifs sur lesquels s'appuient les aménageurs de la ville pour projeter ce qu'ils souhaitent que l'espace urbain devienne [AP06a]. Parmi ces outils on citera les scénarios prospectifs qui permettent de guider les décisions. Cette démarche est productrice de nouvelles informations. Un scénario est défini comme "*un récit cohérent qui décrit une ou plusieurs anticipation(s) plausible(s) du futur, relativement à un sujet donné (l'environnement, l'économie, les représentations sociales, etc)*" [Pou03]. Un scénario ne prend tout son sens que lorsqu'il est comparé à d'autres scénarios ou confronté à la réalité. Cette construction de scénarios est fondée sur deux règles [Pou03] :

- Utilisation d'une succession d'images pour avoir une description synchronique du système à différents moments de son évolution ;

- Construction d'un cheminement entre les images par les relations de causalité qu'ils entretiennent avec le reste du système et en utilisant des évènements hypothétiques pour déclencher des transitions d'une image à une autre.

La construction des scénarios prospectifs spatialisés afin de modéliser les changements d'occupation du sol se définit en quatre étapes [Pou03] :

- Délimitation de l'espace urbain concerné en définissant la résolution spatiale (taille des objets géographiques) et l'étendue de cet espace ;
- Identification des facteurs explicatifs des changements d'occupation du sol observés ainsi que l'évolution des modes d'aménagement de l'espace urbain en sa basant sur les expériences du passé et du présent ;
- La spatialisation des scénarios prospectifs à l'aide d'une méthode adaptée (choix des hypothèses à tester et d'un type de scénario adapté) ;
- L'évaluation des scénarios et leurs impacts sur le plan environnemental afin d'illustrer concrètement la plus-value des scénarios prospectifs.

D'un autre côté, il est essentiel de pouvoir produire des structures spatiales allant de l'entité bâtiment, en passant par les groupements urbains d'objets bâties, à la métropole dans son ensemble afin que les dynamiques urbaines soient interprétables à plusieurs niveaux d'observation [San04]. Pour cela, les modélisateurs ont souvent recours aux techniques de simulation pour formaliser le comportement de ces structures suivant des règles spécifiques à chaque scénario. A l'heure actuelle, l'informatique n'est plus utilisée seulement pour la cartographie des recensements mais elle commence à intervenir dans le domaine de la confection des plans d'occupation des sols (POS) [Lau94].

Ainsi de ces deux familles d'approches (analyse multi-critères de décision et analyse prospective) se déclinent plusieurs outils d'aide à la décision dédiés aux acteurs et aux urbanistes permettant d'envisager l'amélioration de certaines étapes des processus de décision précédemment décrits. On présentera certains de ces outils dans la section suivante.

2.4 Des outils d'aide à la décision pour la planification urbaine

Pour mettre au point les techniques relatives aux approches de prospection ou des analyses multicritères de décision, les acteurs relatifs au processus urbain ont souvent besoin d'outils d'aide à la décision afin de simuler des scénarios de développement urbain ou pour évaluer les conséquences des actions selon certains critères [Lau94]. Les modélisateurs doivent repenser, à travers ces outils, l'usage traditionnel de la logique pour déboucher sur la connaissance des systèmes dans lesquels le temps, l'espace et le comportement humain jouent un rôle fondamental dans la détermination de la solution [Saa84]. Plus spécifiquement, dans le cadre des systèmes urbains, l'aide à la décision consiste à déterminer les paramètres qui décrivent les propriétés spatiales de la population, à simuler différents scénarios ou hypothèses sur l'évolution de l'organisation spatiale et l'expansion des entités urbaines de la ville [GMP⁺96] selon certains critères préétablis.

Un outil d'aide à la décision désigne donc tout outil permettant d'éclairer les prises de décision des décideurs comme un bureau d'études en urbanisme ou les membres d'un conseil municipal responsables de la bonne gouvernance des villes [Lau94]. Ces outils constituent également des générateurs de formes urbaines, qui permettent de visualiser les procédures de planification de l'espace urbain et de formuler des règlements urbains. Plus spécifiquement, il s'agit d'un

système d'aide à la planification urbaine facilitant l'élaboration d'un plan d'urbanisme en se basant notamment sur un SIG et sur des décisions souvent collectives en toute connaissance de causes et de conséquences [Lau94]. En effet, en plus de la représentation des résultats des simulations de manière compréhensible, ces outils peuvent également offrir au modélisateur la possibilité de chiffrer les coûts des politiques choisies et d'étudier plus finement certains aspects de la planification urbaine [Lau94].

Plusieurs outils d'aide à la conception urbaine ont été développés pour gérer la complexité de l'élaboration des plans d'aménagement dans l'environnement urbain [GBMD10]. On trouve parmi eux, des outils commerciaux et des outils libres pour l'aide à la conception urbaine qu'on présentera dans la première section du chapitre. Chacun de ces outils utilise un modèle informationnel de la ville (CIM : city information model) basé sur l'ontologie urbaine [GBMD10]. Ce modèle permet de spécifier les objets qui constituent les éléments de base de la conception urbaine tels que les routes, les trottoirs, les bâtiments, etc. Cependant, la mise en œuvre du modèle (CIM) [HWT⁺05] et le niveau de détail de description des plans d'aménagement diffèrent d'un outil à un autre [GBMD10]. Pour classer ces outils nous nous sommes référés à la classification présentée dans [GBMD10] pour évaluer les différents outils de conception urbaine en fonction de leur niveau d'intégration des différentes caractéristiques requises par un (CIM) [HWT⁺05]. Ainsi en se basant sur cette classification nous avons pu dégager cinq principaux critères à savoir :

- Conception des règlements d'urbanisme définis pour la ville : si l'outil intègre l'ontologie urbaine et répond aux règlements d'urbanisme ainsi que les stratégies définis pour le site ;
- Prise en compte de l'existant : si l'outil tient compte du contexte, et permet d'intégrer des informations sur le site ainsi que sur la population ;
- Formulation de programme d'intervention : si l'outil fournit un ensemble de patrons pour la conception urbaine, offre un appui à la formulation de programmes d'intervention en milieu urbain et permet l'interaction entre les données et la conception ;
- Génération de forme urbaine : si l'outil inclut un modèle de génération de formes urbaines ou fournit une visualisation interactive des sorties ;
- Evaluation : si l'outil permet d'effectuer une évaluation, une notation des différents plans urbains et une analyse des indicateurs de durabilité proposés.

En se basant sur ces critères, les principaux outils d'aide à la conception qu'on a pu identifier seront classés dans le tableau Tab. 2.1. D'après ce tableau on déduit que la majorité des outils d'aide à la décision pour la planification urbaine cherchent à générer des formes urbaines qui obéissent à des règlements d'urbanisme conçus pour la ville. La prise en compte de l'existant et l'évaluation des villes proposées restent néanmoins des caractéristiques peu développées dans ce type d'outils.

Même si les buts de ces systèmes d'aide à la planification urbaine sont relativement clairs, leur réalisation peut être confrontée à de nombreuses difficultés. Parmi celles-ci, les conflits possibles entre les institutions intervenantes sur le projet en cas d'absence de protocole d'accord inter-institutionnel précisant exactement les rôles de chacun d'entre eux, leurs responsabilités et leurs contributions [Lau94]. Cependant, ces acteurs devront respecter le principe que la résolution d'un problème urbain ne doit pas créer d'autres nouveaux problèmes, avec un certain temps de latence [BG99b]. Ces outils doivent également permettre aux acteurs concernés par les prises de décision en matière de planification urbaine de mettre à jour les données introduites dans le système afin d'asseoir leurs décisions sur des données géographiques justes et actualisées [Lau94].

Critères \ outils	City CAD [Boe09]	City Engine [WMWG09]	City Zoom [TABG08]	AutoCAD Civil 3D [GD10]	City Induction [BDS08]	Swarm City [Lea09]
Conception des règles d'urbanisme pour la ville	✓	✓	✓		✓	✓
Prise en compte de l'existant		✓			✓	✓
Formulation de programme d'intervention	✓		✓	✓		
Génération de forme urbaine	✓		✓	✓	✓	✓
Evaluation					✓	✓

TABLE 2.1 – Quelques outils d'aide à la décision pour la planification urbaine classés selon les caractéristiques du modèle informationnel de la ville (CIM : city information model)

Nous constatons à la fin de cette section que la plupart de ces outils développés pour étudier les systèmes urbains ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante à nos objectifs de recherche formulés par rapport à la modélisation des dynamiques urbaines et à la modélisation des systèmes complexes spatiaux en général puisque nous visons la ré-exploitation de modèles existants au travers du couplage.

En effet, ces outils n'offrent pas des solutions complètes d'aide à la décision étant donné qu'ils ne prennent pas en considération tous les facteurs qui interviennent dans la création de la forme urbaine (facteurs économiques, socio-démographiques, politiques, etc). Néanmoins nous nous intéressons à ces outils pour comprendre que doivent être les sorties du simulateur que nous comptons développer dans le cadre de notre cas d'étude relatif à la ville. Les interfaces de ces outils peuvent également nous inspirer lors du paramétrage de notre propre outil.

Dès lors, il paraît plus pertinent de recourir à plusieurs modèles issus d'approches disciplinaires variées pour aborder la ville selon les différents points de vue des démographes, des économistes et des géomètres qui vont tous participer à travers leurs propres modèles multi-échelles dans l'analyse et la croissance de la ville [CGM06]. Nous présentons dans la section suivante certains de ces modèles.

2.5 Composants et modèles du système urbain

Par opposition à la description multi-niveaux de la ville proposée par [PMKP10] propose une description basée sur une vision systémique, où la ville est décomposée en systèmes, eux-mêmes décomposés en sous-systèmes jusqu'à arriver au niveau objet, qui est le niveau micro dans lequel sont stockés les données de la ville [PMKP10]. Ainsi pour mieux étayer les outils nécessaires au pilotage urbain, il nous semble indispensable de cerner la ville en tant que système et ainsi mieux voir où peuvent se situer les leviers de commande qui permettront de la faire évoluer selon une direction jugée intéressante.

Par référence à la ville ce système est appelé système urbain [Lau94]. Le système urbain est donc par définition le système physique proprement dit de la ville qui regroupe l'ensemble des objets spatiaux, tels que des bâtiments ou des groupes d'habitat rattachés à un espace public (les réseaux, les rues, les places ou les parcs) et à des équipements sur lesquels peuvent porter des décisions [Par09]. A l'intérieur de cette structure globale du système urbain on peut distinguer 8 sous systèmes [Lau94] qui évoluent à différentes échelles d'espace et de temps à savoir : la population, l'emploi, les bâtiments, l'aménagement de l'espace urbain, le transport, l'environnement, les finances publiques et les services publics. L'ensemble de ces composantes sont en interaction comme illustré dans la figure (Fig. 2.1).

Les interactions entre les différents sous systèmes sont contrôlées généralement par des règles de croissance ou des règles de comportement des acteurs appartenant au système urbain (localités, citadins, etc) [Sil10]. En pratique, dans la modélisation spatiale et urbaine, pour représenter ces processus, il faut faire appel à un ensemble de modèles empruntés à différentes disciplines [Sil10]. En effet, de nombreux modèles relatifs au système urbain existent aujourd'hui à base de paradigmes très variés, allant des mesures statistiques, aux équations mathématiques, aux systèmes multi-agents [Per06].

Pour limiter le nombre de ces modèles, nous avons opté pour le regroupement des sous-systèmes qui appartiennent aux mêmes thématiques dans un même modèle (Fig. 2.1). Ainsi, on peut distinguer quatre types de modèles : les modèles démographiques (sous-système : population), les modèles économiques (sous-systèmes : emploi, services publics, finances publiques),

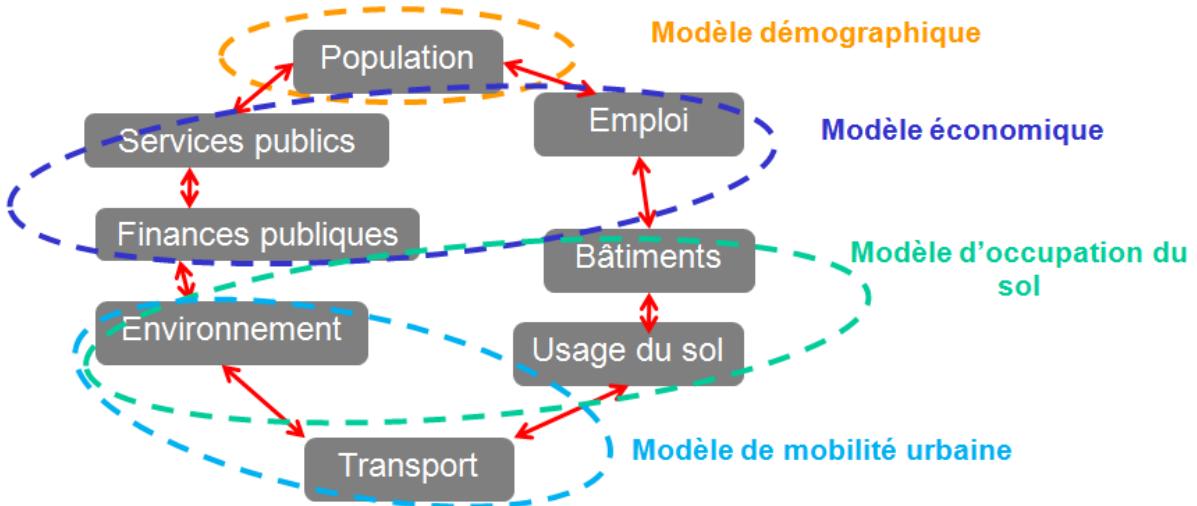


FIGURE 2.1 – Les composants du système urbain [Lau94]

les modèles de la mobilité urbaine (sous-systèmes : transport, environnement) et les modèles d'aménagement du sol (sous-systèmes : bâtiments, environnement, usage du sol).

Nous présentons dans les sections suivantes, certains de ces modèles qui ont été choisis pour leur caractère spatial, l'hétérogénéité de leurs formalismes, l'aspect multi-échelles spatiales et temporelles. Notons que certains de ces modèles seront exploités dans le cadre de notre cas d'étude portant sur la problématique de l'aménagement urbain. Nous présentons ci-dessous les principales caractéristiques de ces modèles.

2.5.1 La dynamique démographique

La dynamique des populations est définie comme une science expliquant la variation du nombre d'individus dans une ville au cours du temps et ce à travers des modèles [Pie10]. Un modèle démographique a pour but généralement de prendre en considération les caractères spécifiques de la population qui se concentre dans les villes. Ainsi les modèles démographiques sont utilisés pour prédire l'évolution de la population et estimer la variance des taux démographiques comme les taux de natalité, de mortalité, d'attractivité de la ville, etc.

En effet, le calcul de la nouvelle population se fait en fonction du taux d'évolution démographique de la ville, mais doit aussi tenir compte des phénomènes de l'immigration en ville par l'effet d'attraction que cette dernière exerce sur son entourage [PPK06]. Les principaux résultats des modèles démographiques sont le dénombrement de la population. Parmi ces modèles nous pouvons citer le modèle Malthus [Min61], le modèle Verhulst [Sch81] et le modèle de Lotka et Volterra [HP85]. Nous reprenons dans ce qui suit l'ensemble de ces modèles avec plus de détails afin de mieux les analyser et les comprendre.

Le tableau (Tab. 2.2) présente la récapitulation des modèles démographiques présentés ci-dessus qui permet d'avoir une vue globale sur les caractéristiques qui nous intéressent le plus dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux à savoir la complexité spatiale, temporelle et décisionnelle des modèles ainsi que les entrées et les sorties concernant la ville. A partir de ce tableau (Tab. 2.2), nous pouvons conclure que les modèles démographiques, quel que soit leur principe de fonctionnement, évoluent en général à l'échelle de la ville avec une

temporalité qui peut être évènementielle ou au pas de temps selon les choix du modélisateur. L'exécution de ces modèles est étroitement liée à un ensemble de paramètres relatifs à la ville dont certains peuvent être collectés de l'espace. L'ensemble des sorties peut être spatialisé grâce à des calculs qui permettent de déduire les conséquences de ces données sur l'espace (ex : nouvelle taille de la population nécessite la construction d'un certain nombre de logements).

La croissance rapide de la population urbaine revient généralement à la croissance économique de la ville qui produit une vague de migrations vers les villes. Jane Jacobs [Jac69] considère même que plus la ville attire des gens créatifs plus la croissance économique est stimulée. La concentration du capital humain est considérée comme le facteur central de la croissance économique d'une région. Une nouvelle sélection de population vient occuper les emplois urbains proposés en fonction de l'âge, le genre, le niveau d'études, etc. Ce phénomène d'attraction permet donc aux urbanistes de mettre en place des politiques urbaines adaptées en anticipant les grandes tendances économiques dans des modèles économiques dont nous présentons quelques uns dans la section suivante.

Modèle démographique	Principe de fonctionnement	Espace	Temps	Prise de décision humaine	Entrées	Sorties
Modèle de Malthus [Min61]	Modéliser la croissance exponentielle de la population	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable de la variation des paramètres	Taux de naissance, taux de mortalité, taille de la population	Nouvelle taille de la population
Modèle de Verhulst [Sch81]	Modéliser la croissance non exponentielle de la population	Environnement comportant un frein de croissance et une capacité d'accueil bien déterminée	Loi d'action de masse	Unité décisionnelle de base responsable de la variation des paramètres	Taux de variation, taille de la population	Nouvelle taille de la population
Modèle de Lotka et Volterra [HP85]	Modéliser l'évolution d'une population basée sur le système proie prédateur	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable de la variation des paramètres	Taille de la population de la proie, taille de la population du prédateur	Nouvelle taille de la population de la proie, nouvelle taille de la population du prédateur

TABLE 2.2 – Récapitulatif des modèles démographiques

2.5.2 La dynamique économique

La ville est considérée comme une entité économique au fonctionnement complexe [CGM06], qui est au centre de nombreux enjeux économiques, écologiques et sociaux ce qui justifie cet intérêt pour la gestion urbaine [Sil10]. Cet avantage économique et social des zones urbaines fait de la ville un moyen de production de richesses très efficace [Sil10]. Ce lien observé au sein de la ville entre croissance économique et urbanisation est souvent associé à de nombreux résultats positifs, comme [Sch11] l'innovation technologique, le progrès économique, les formes de créativité, les niveaux de vie plus élevés, l'employabilité des femmes, etc.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur les questions relatives à l'économie de la ville dans un nouveau courant d'étude appelé économie urbaine (ou encore la géographie économique) dont l'objectif est de modéliser la répartition des activités économiques dans l'espace [FT97]. En d'autres termes, l'économie urbaine [Cap08] est une science qui étudie la relation entre la vie économique et l'espace vécu, étant donné qu'il n'y a pas de vie économique sans espace urbain. Historiquement, la prise en compte de l'espace dans l'analyse économique reste relativement récente.

En effet, cette science trouve ses origines dans les travaux de la structuration spatiale des villes américaines au cours des années 60 qui constituent la base de la nouvelle économie urbaine monocentrique (notamment les travaux de [Win61], [Alo64], [Mut69]). L'économie urbaine est centrée sur la maximisation d'une fonction d'utilité [CPCR07]. Les modèles de l'économie urbaine fournissent des sorties liées à l'attribution de l'espace pour les activités économiques [Pum98] comme par exemple la distribution spatiale de l'emploi dans le secteur industriel de base et dans le secteur des services (modèle Lowry [Low64], modèle de Von Thunen [Hur94]). Cependant dans la littérature, il existe d'autres modèles qui génèrent d'autres types de sorties comme le nombre de nouveaux bâtiments à construire (de type commercial, industriel, résidentiel) (modèle CITYDEV [SAAG03]).

Le tableau (Tab. 2.3) présente la récapitulation des modèles économiques présentés ci-dessus qui permet d'avoir une vue globale sur les caractéristiques qui nous intéressent le plus dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux à savoir la complexité spatiale, temporelle et décisionnelle des modèles ainsi que les entrées et les sorties concernant la ville. Dans le tableau (Tab. 2.3), nous pouvons observer que les modèles économiques, et particulièrement ceux qui s'intéressent à l'économie urbaine, sont étroitement liés à la composante espace de la ville. Certaines des entrées nécessaires à l'exécution des modèles sont collectées de l'espace. Quelques sorties sont directement spatialisées comme par exemple la dispersion spatiale des activités économiques.

Comme le développement économique a un effet déterminant sur l'organisation et la forme de la ville, le choix de localisation est fortement dépendant de la disponibilité des services publics et privés comme les équipements scolaires et sanitaires, les logements pour les employés. Ainsi nous nous intéressons dans ce qui suit aux modèles de mobilité urbaine qui agissent sur le développement des activités économiques dans la mesure où les réseaux de transport assurent l'accessibilité vers les zones de travail. Notons également que les industries et les services se concentrent généralement pour une plus grande efficacité et une maximisation du profit et la minimisation des coûts totaux de transport.

Modèle économique	Principe de fonctionnement	Espace	Temps	Prise de décision humaine	Entrées	Sorties
Modèle de Von Thunen [Hur94]	Modéliser la distribution monocentrique des emplois	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable de la variation des taux qui implique le changement du système	Centre d'emplois, distance X sur les réseaux routiers séparant l'entité économique du centre	Coût de la production
Modèle de Lowry [Low64]	Modéliser la distribution des activités économiques de base, des emplois connexes de services et de la population correspondant à ces emplois	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable du paramétrage du système	Répartition des activités de base, multiplicateur des activités de base, multiplicateur des activités de services	Répartition des activités de service, nouvelle taille de la population engendrée par ces emplois
Modèle CityDEV [SAG03]	Modéliser des échanges de biens et de services dans les marchés de la ville	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable du paramétrage du système	Prix des biens, taille de la population d'agents, monétaires du marché	Nouveaux bâtiments à construire

TABLE 2.3 – Récapitulatif des modèles économiques

2.5.3 La dynamique de la mobilité urbaine

Étant donné l'étalement urbain constaté dans les grandes villes, la mobilité est devenue un élément essentiel pour la compréhension du fonctionnement des villes. Dans l'analyse des dynamiques socio-spatiales on remarque généralement que les formes de mobilité sont associées à des modes de vie différents [DC02]. Ainsi, en raison de la complexité des processus comportementaux il va falloir prendre en considération la diversification des parcours individuels, des critères de choix de résidence, ou des processus d'affectation des lieux.

Pour cela, la modélisation de la ville nécessite d'articuler entre autres un système de localisation et un système de déplacement [Peg00]. La préoccupation essentielle des systèmes de mobilité urbaine est de proposer une politique des déplacements urbains qui lutte contre la pollution et le bruit engendrés par ces déplacements dans le but d'améliorer le cadre de vie des citoyens. Ceci se traduit par l'élaboration de modèles de la mobilité urbaine dont l'objectif essentiel est d'étudier l'investissement dans les réseaux de transport, en particulier dans le réseau routier et autoroutier, qui est un stimulant puissant du développement de la ville [Sch11].

Ainsi ces modèles sont centrés sur l'étude des différentes combinaisons de l'utilisation du sol avec les politiques de transport et l'évolution économique, sociale, environnementale de la ville [MLCP06]. Les sorties observées dans ce type de modèles sont tous liés à l'allocation de l'espace et l'utilisation des réseaux routiers [MLCP06] car ils étudient la mobilité urbaine quotidienne générée des citoyens, la dispersion de ce trafic sur les différents réseaux routiers et le transport public relatif aux activités de la ville. Les résultats de ces modèles peuvent être aussi la hiérarchisation du réseau de voirie par rapport au réseau principal de transports collectifs.

Dans ces modèles, il est essentiel de prendre en compte certains paramètres comme : l'aménagement des accès aux gares, le développement des quartiers verts sans pollution, les cheminement pour les personnes à mobilité réduite, l'accès des piétons vers les établissements scolaires ou sportifs et le stationnement sur les domaines privés ou publics pour les taxis, les véhicules à deux roues ou les véhicules de livraison des marchandises. Dans cette catégorie, on peut citer le modèle UrbanSim [Wad02], le modèle Miro [MLCP06] ainsi que le modèle Simulbogota [Qui07]. Nous reprenons dans ce qui suit l'ensemble de ces modèles avec plus de détails afin de mieux les analyser et les comprendre.

Dans le tableau (Tab. 2.4) nous récapitulons l'ensemble des caractéristiques des modèles de mobilité urbaine décris ci-dessus et relatifs aux systèmes complexes spatiaux à savoir la complexité spatiale, temporelle et décisionnelle des modèles ainsi que les entrées et les sorties concernant la ville. A partir de ce tableau (Tab. 2.4), nous pouvons déduire que les modèles de la mobilité urbaine sont très attachés à la composante espace de la ville. Même si les paramètres d'entrées peuvent être saisis par l'utilisateur ou collectées à partir du système géographique de la ville, les sorties sont pratiquement toutes observables à partir de l'espace comme par exemple la distribution spatiale des réseaux urbains, la mobilité des ménages, etc.

L'évolution des flux de transports, en milieu urbain est à l'origine de nombreux effets externes sur l'environnement [Peg00]. En effet, le développement des réseaux de transport augmente généralement la densité d'habitation autour des stations étant donné qu'au niveau micro-économique, les ménages font un arbitrage, entre le prix du logement et le prix des transports pour aller travailler [Sch11]. D'où la corrélation très étroite de ce type de modèles avec les autres modèles d'aménagement de la ville. Nous présentons dans ce qui suit certains de ces modèles d'aménagement du sol.

Modèle de mobilité	Principe de fonctionnement	Espace	Temps	Prise de décision humaine	Entrées	Sorties
Modèle UrbanSim [Wad02]	Prévoir la distribution des réseaux urbains en fonction des paramètres socio-économiques	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Décisions individuelles dépendent d'un ensemble de paramètres socio-économiques et environnementaux	La population, les emplois, les prévisions économiques, le développement territorial, les contraintes environnementales	simulation de la distribution des réseaux urbains, la densité de développement, les conséquences environnementales
Modèle Miro [MLCP06]	Modéliser des mobiles urbains dans un trafic ambiant	Échelle réelle de la ville	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable du paramétrage du système	Nombre de mobiles, bases de données géographiques de la ville	Mobilité observée au sein de la ville
Modèle SIMULBO-GOTA [Qui07]	Modéliser la mobilité résidentielle	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Processus de décision des ménages	Descriptions socio-économiques, distribution spatiale des ménages et des logements	Evolution et dispersion des logements et des ménages

TABLE 2.4 – Récapitulatif des modèles de la mobilité urbaine

2.5.4 La dynamique d'occupation du sol

Longtemps enfermée par les murs d'enceintes, la croissance des villes s'est faite au début sur les faubourgs proches. Ce n'est qu'après le développement des moyens de transport que la dispersion de la population s'est réellement étalée repoussant ainsi les frontières initiales de la ville. Ce mouvement se caractérise par une diminution des densités en son centre et une occupation plus lointaine de l'espace [Peg00]. Les modèles d'aménagement de l'espace urbain sont utilisés pour analyser les évolutions de l'utilisation du sol à partir de bases de données historiques et de simuler les dynamiques urbaines sur la base des hypothèses [PCGR10a]. Ces bases de données sont généralement composées de données topographiques ainsi que des photographies aériennes et des cartes historiques.

Les modèles d'occupation du sol cherchent à comprendre et modéliser les lois qui gouvernent les dynamiques urbaines afin de pouvoir simuler l'évolution et l'étalement des villes [PCGR10b]. Notons que la densité est un paramètre très important dans ce type de modèles car une forte concentration de population réduit les coûts de transport, diminue les dépenses publiques au titre de l'infrastructure et des services, facilite la production industrielle des biens à moindre coût et la diffusion des connaissances [Sch11]. Le point crucial réside alors dans la définition d'une localisation particulière de chacune des fonctions urbaines de la ville en fonction de l'organisation spatiale de cette dernière.

Les sorties observées dans ce type de modèle sont généralement : le développement de bâtiments dans la ville, la distribution spatiale des nouveaux bâtiments qui répondent aux règles de l'évolution définies par le concepteur, toutes les possibilités de découpage de l'espace urbain basé sur un système de négociation entre acteurs. Dans le reste de la section nous allons détailler certains de ces modèles afin d'illustrer leur mode de fonctionnement. Ainsi dans cette catégorie, on peut citer le modèle GeOpenSim [PCGR10b] le modèle élaboré par Victor Silva [Sil10] et le modèle SMAALA développé par Nils Ferrand [Fer03].

Dans le tableau (Tab. 2.5) nous présentons l'ensemble des caractéristiques des modèles d'occupation du sol décrits ci-dessus. Nous nous intéressons particulièrement aux caractéristiques relatifs aux systèmes complexes spatiaux à savoir la complexité spatiale, temporelle et décisionnelle des modèles ainsi que les entrées et les sorties concernant la ville. A partir de ce tableau (Tab. 2.5), nous pouvons observer que les modèles d'occupation du sol sont les plus attachés à la composante espace de la ville. En effet les entrées et les sorties de tous les modèles sont à caractère spatial. Le système géographique de la ville constitue une composante primordiale pour ce type de modèles. Le but principal de ces modèles est d'observer les scénarios d'aménagement spatial possibles pour la ville. Notons par ailleurs que la complexité spatiale, temporelle et décisionnelle reste assez élevée étant donné la multitudes des acteurs qui interviennent dans les processus d'organisation spatiale.

Modèle d'occupation du sol	Principe de fonctionnement	Espace	Temps	Prise de décision humaine	Entrées	Sorties
Modèle GeOpenSim [PCCR10b]	Modéliser les propriétés d'auto-organisation des systèmes urbains en se basant sur les règles d'évolution des objets spatiaux	Hierarchie d'agents topographiques (bâtiments, routes, rivières,...)	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable du paramétrage du système	Système géographique de la ville	Simulation de l'évolution future de la ville
Modèle des agents vecteurs multi-échelles [Sii10]	Déterminer la localisation de nouveaux bâtiments en se basant sur des règles de comportement ou de croissance des objets spatiaux	Echelle réelle de la ville	Unité temporelle de l'analyse	Unité décisionnelle de base responsable du paramétrage du système	Bâtiments de la ville avec leurs localisations et leurs fonctions	Dispersion des nouveaux bâtiments au sein de la ville
Modèle SMAALA [Fer03]	Développer un outil d'aide à l'expertise en morphogénèse urbaine multicritères et multiacteurs	Surface géographique totale de l'espace étudié	Unité temporelle de l'analyse	Processus de décision des acteurs intervenants dans le processus d'aménagement de la ville	SIG de la ville, les acteurs, l'ensemble des critères à optimiser, système d'évaluation des acteurs	Simulation des scénarios possibles pour l'organisation spatiale de la ville

TABLE 2.5 – Récapitulatif des modèles d'occupation du sol

Type du modèle	Empl	Pop	Bât	Par	Rés. routes	Transp. public
Modèle démographique		✓	✓			
Modèle économique	✓		✓		✓	
Modèle de transport					✓	✓
Modèle d'occupation du sol			✓	✓	✓	

TABLE 2.6 – Récapitulatif des entrées et des sorties des modèles du système urbain

Légende : Act.économ : Activités économiques, Empl : Emploi, Pop : Population, Bât : Bâtiments, Par : Parcelles, Rés.routes : Réseaux des routes, Transp. public : Transport public

Plus généralement, l'essor des modèles relatifs aux dynamiques urbaines témoignent d'efforts convergents pour introduire, en géographie humaine, des techniques sophistiquées telles qu'elles sont déjà utilisées en sciences physiques. Tous ces modèles constituent pour nous une vaste base de choix pour la construction du système urbain que nous cherchons à modéliser.

Nous récapitulons dans le tableau (Tab. 2.6), l'ensemble des paramètres manipulés par les différents modèles. Notons que le composant principal sur lequel se basent tous les modèles qui constituent le système urbain est l'espace. En effet, si on recense les cases les plus cochées dans le tableau (Tab. 2.6), on remarque que l'espace composé de bâtiments, parcelles et réseaux routiers constitue le centre d'intérêt commun aux différents modèles du système urbain.

A la fin de cette section nous pouvons déduire que plusieurs éléments participent à l'organisation du système urbain [Pae72] comme les actions des décideurs politiques, économiques ou culturels et les contraintes qu'imposent les structures spatiales aux activités humaines ainsi que l'évolution des comportements des résidents tout au long de leur vie. Ce qui explique le caractère complexe spatial du système urbain. Cette section nous montre encore une fois la corrélation entre les différents types de modèles identifiés pour la modélisation des villes et la nécessité de trouver un moyen de les coupler afin d'avoir une meilleure vue sur l'évolution de la ville.

De part les possibilités méthodologiques et techniques qu'elle offre, la modélisation agent amène à renouveler la réflexion sur les transformations des configurations spatiales qui résultent des interrelations et inter-influences entre les processus à la base du changement urbain. Il s'agit dans un second temps de se pencher sur les moyens disponibles pour intégrer ces processus issus de différentes disciplines : démographiques, économiques, etc. Nous étudions dans ce qui suit les différentes techniques d'intégration des modèles avec le paradigme agent sur lequel nous portons notre attention pour résoudre la problématique de l'intégration des modèles.

2.6 Intégrer des processus pour étudier une question spatiale complexe

L'étude d'une question spatiale complexe comme l'étude des dynamiques urbaines, nécessite pour un thématicien qu'il soit écogiste, économiste, urbaniste, etc, de faire appel à des savoirs et des compétences interdisciplinaires [Sil10], [Fia01]. En effet, étant donné que par définition, un modèle est une représentation d'une réalité d'un certain point de vue, il ne peut pas décrire tous les phénomènes du réel [Fia01]. Trop de paramètres sont impliqués dans une étude d'un système spatial complexe (en particulier la ville). Ainsi, quand il s'agit de modéliser des systèmes spatiaux complexes, la combinaison des méthodes relatives à plusieurs disciplines constitue un bon moyen pour formaliser et tester le modèle de la thématique globale [Fia01].

Bien qu'étant différentes, les potentialités de ces disciplines sont complémentaires. Chacune de ces disciplines intègre la dimension spatiale des phénomènes étudiés sous des aspects différents avec ses atouts propres. Ceci a pour but d'intégrer des connaissances liées à la thématique de la recherche d'une part et des connaissances des experts en support pour cette thématique comme l'informatique, les statistiques, la géomatique, les mathématiques d'autre part.

Ces collaborations entre thématiciens peuvent par exemple amener à un enchaînement de modèles [Sil10] : un modèle de données SIG pour créer et stocker des indicateurs spatiaux ; un modèle statistique afin d'estimer des données prospectives ou tester la significativité de la relation entre les variables utilisées (distances, formes d'espacement ou types de voisinages par exemple) ; un modèle d'équations différentielles pour étudier les évolutions globales d'un certain nombre de variables d'état ; un modèle d'automates cellulaires capable de simuler les interactions spatiales locales ; un modèle orienté agent qui peut rendre compte des effets des coopérations entre les différents acteurs intervenant dans le processus décisionnel (Fig. 2.2).

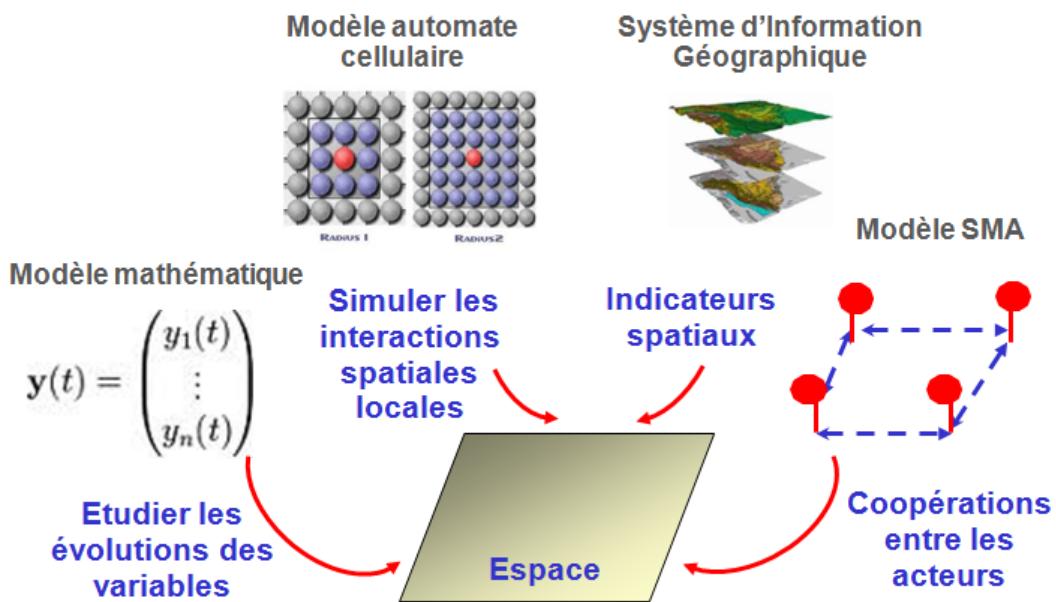


FIGURE 2.2 – Principe de la modélisation interdisciplinaire : l'intégration de modèles hétérogènes pour modéliser un système spatial complexe

Ainsi pour pouvoir modéliser des phénomènes et des processus spatiaux, la démarche naturelle à adopter consiste à construire un modèle intégré qui permet de prendre en compte l'ensemble des processus impliqués dans l'évolution du système global étudié [Fia01]. Dans la littérature, le terme intégration désigne l'adaptation des modèles pour qu'ils puissent fonctionner les uns avec les autres [Fia01]. Ceci peut aussi correspondre à la réécriture d'un modèle unique à partir de plusieurs autres modèles. Dans le cas de l'intégration de logiciels préexistants, il faut prendre en considération les problèmes techniques liés à l'interopérabilité des différents simulateurs à intégrer. Cette intégration des modèles peut se faire dans certains cas de façon ad hoc non formalisée dans le but de répondre rapidement à une question spécifique particulière dans une plate-forme expérimentale dédiée [Sie11].

Les approches d'intégration de modèles dites ad hoc sont utilisées pour répondre aux besoins d'une étude spécifique et n'ont pas pour vocation d'être génériques. Le modélisateur se concentre sur le niveau sémantique de l'intégration en relation directe avec le but de son étude. Par la suite, les aspects techniques et dynamiques de la modélisation sont traités comme s'il s'agit d'une solution logicielle spécifique à l'étude en cours. Ce type d'intégration est souvent adopté dans l'étude des phénomènes complexes car elles présentent une grande souplesse en pratique et permettent de mettre sur pied rapidement des outils de modélisation qui répondent exactement aux besoins du modélisateur.

Dans la littérature, il existe deux types d'approches ad hoc. La première catégorie concerne l'intégration opérationnelle des modèles, la deuxième intègre plutôt les simulateurs (les modèles implémentés) en ad hoc [Sie11]. L'intégration opérationnelle consiste à concevoir chaque modèle dans son propre formalisme. Par la suite, les modèles sont tous implantés dans un même langage informatique pour être intégrés dans un même logiciel de simulation. Ainsi, les différences entre les formalismes sont gérées au niveau technique via le langage informatique. Cette démarche est très répandue dans la conception d'outils informatiques nécessitant l'implantation des modèles sous forme de composants légers (plugins) qui s'exécutent de manière concurrente pour augmenter les performances de l'application. Au niveau dynamique, cette approche ne nécessite qu'un seul simulateur qui peut être centralisé ou distribué selon l'outil utilisé. Cette démarche montre des limites quand il s'agit d'intégrer ou de réutiliser simultanément des modèles déjà implantés dans des plateformes de simulation.

Pour répondre à cette contrainte de réutilisation de logiciels existants, une nouvelle famille d'approches d'intégration ad hoc de simulateurs a vu le jour dans le cadre d'études spécifiques. Ainsi, chaque modèle est implanté avec son propre formalisme dans son propre simulateur. Les problèmes techniques liés à l'interopérabilité sont gérés au niveau des simulateurs directement ce qui permet de répondre à la contrainte de réutilisation des simulateurs et de gagner le temps d'implémentation des modèles. Cette générnicité est limitée quand il s'agit de gérer des simulateurs à différentes échelles spatiales et temporelles.

De manière générale, l'intégration ad hoc assure la rapidité en pratique dans la construction de nouveaux modèles spécifiques à une problématique donnée. Dans cette démarche, le modélisateur se focalise sur un cas d'étude particulier et propose une plate-forme expérimentale dédiée. Ceci se fait au détriment de la générnicité ce qui limite la possibilité de réutilisation des modèles et des simulateurs obtenus par la communauté scientifique pour comparer ou reproduire les résultats de simulations obtenues par ces méthodes ad hoc. En effet, l'ensemble des questions posées aux niveaux conceptuels, sémantiques et syntaxiques sont très peu définies et se gèrent uniquement au niveau technique. Les approches ad hoc s'avèrent relativement contraignantes lorsque l'on cherche à coupler des modèles qui représentent des niveaux d'abstraction et des échelles

différents dans la mesure où les niveaux d'abstraction et les liens entre eux restent souvent figés lors de l'intégration.

A la différence de l'intégration ad hoc on trouve dans la littérature d'autres approches basées sur l'intégration formelle des modèles. Ce type d'intégration consiste à intégrer les différents modèles en utilisant un formalisme commun plus générique que ceux des modèles élémentaires intégrés. Ce qui facilite la reproduction et la validation des résultats. Concrètement cela peut correspondre à la réécriture des modèles dans un formalisme plus générique pour construire un nouveau modèle unique [Dub04]. La deuxième démarche est basée sur l'encapsulation des formalismes [Ram06], qui consiste à construire une interface pour passer du formalisme particulier de chaque modèle au formalisme générique capable de pouvoir englober tous les autres formalismes. C'est le cas du formalisme DEVS (discrete event system specification) où les modèles sont réécrits dans le formalisme DEVS avant leur intégration [ZKP00], [Ram06].

L'intégration formelle est plus forte puisqu'elle spécifie les liens entre les modèles et intègre le niveau syntaxique [Sie11]. Cela facilite la mise en place d'un simulateur et assure une meilleure reproduction des résultats de simulation. Cependant la réutilisation des modèles existants est limitée par la nécessité de les convertir dans le formalisme générique choisi qui peut présenter des contraintes dans certains cas. Parmi les paradigmes fréquemment utilisés pour l'intégration formelle des modèles, nous nous intéressons dans ce qui suit aux systèmes multi-agents qui constituent de bons frameworks pour comprendre les systèmes complexes spatiaux.

Intégration orientée service

L'intégration formelle des modèles basée sur les systèmes multi-agents peut être orientée service comme c'est le cas du modèle intégré GRID-SMA de [JDC06] où l'intégration des modèles Grid et multi-agents s'est faite selon une approche centrée sur le concept unificateur de service. Dans ce modèle, les capacités des agents sont instanciées comme des services Grid dans des containers de services. Grâce au contexte de conversation orienté agent, les agents deviennent capables d'échanger au travers de l'infrastructure du GRID [JDC06]. La formalisation des interactions entre agents se fait par un langage de description graphique appelé Langage d'Intégration Agent-Grid (AGIL) qui permet aux agents d'échanger les services sur le Grid. Ainsi dans ce modèle intégré, les aptitudes des agents pour la communication sont utilisées pour assurer les échanges de services et par la suite l'intégration du modèle SMA avec le modèle GRID [JDC06].

Intégration par une modélisation organisationnelle multi-échelles

Pour aborder les différentes descriptions d'une problématique donnée à différentes échelles, l'intégration peut se faire aussi par une modélisation organisationnelle multi-échelles orientée agent. Cette méthode d'intégration organisationnelle a été adoptée dans la modélisation d'un écosystème silvo-pastoral [Mü02] basé sur un certain nombre de modèles hétérogènes à trois niveaux d'organisation spatio-temporelle. Ainsi dans cette structure organisationnelle, les agents d'un niveau d'abstraction donné sont sensibles aux effets du niveau d'abstraction inférieur ce qui permet d'intégrer les différents modèles correspondant à des granularités différentes. Lorsqu'il s'agit d'interaction avec l'extérieur le groupe d'agents est perçu comme un seul individu par contre les échanges internes sont médiés à travers l'environnement. Ce type de modélisation organisationnelle multi-agents assure la bonne granularité et permet d'intégrer des modèles ayant des niveaux d'abstraction différents.

Le but de cette section était d'explorer les différentes manières dont les systèmes multi-agents ont été utilisés pour intégrer des modèles existants afin d'établir des liens entre diverses disciplines permettant de modéliser une problématique donnée de manière interdisciplinaire [Fia01].

Qu'elles soient ad hoc ou formelles ces approches d'intégration restent limitées en terme de réutilisation surtout lorsqu'il s'agit de modèles écrits dans des formalismes différents et qui évoluent à différentes échelles spatiales ou temporelles.

2.7 Positionnement et critiques

Le système urbain, étant un exemple pertinent de système complexe spatial, pourrait constituer une bonne base de travail pour l'étude des méthodes et outils utilisés dans la modélisation des phénomènes spatiaux en général. Ce système urbain (ou ville) est donc un système spatialisé complexe et ouvert [All04] dont les processus urbains et les états qui en résultent, sont analysables à différents niveaux d'échelle [All04] selon des temporalités et des espaces différents.

Notons que le succès de l'urbanisme est étroitement lié aux outils théoriques adéquats pour penser la ville dans son ensemble et agir en conséquence [BN04]. L'objectif du rapide exposé des outils d'aide à la décision était de donner un aperçu sur l'utilisation des outils informatiques pour le pilotage des systèmes urbains, notamment en matière d'aide à la décision, et de planification urbaine. Même si ces outils n'intègrent pas les facteurs économiques et sociaux qui interviennent dans la création de la forme urbaine, ils restent intéressant à étudier pour comprendre le paramétrage et les sorties à générer du simulateur qu'on compte développer pour la ville.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux différents modèles économiques, démographiques, d'aménagement et de transport qui permettent de représenter les composants et les processus de la ville. Ceci nous a permis de déduire que l'espace constitue un élément commun à tous ces modèles. Cet élément peut donc être exploité pour coupler les modèles afin d'avoir une meilleure vue sur l'évolution de la ville.

L'intégration de l'ensemble de ces modèles peut se faire de manière ad hoc ou de façon formelle en utilisant un formalisme générique et en spécifiant les liens entre les modèles. La limite entre un couplage formalisé et une intégration ad hoc de modèles peut être sujette à caution. Néanmoins les deux approches cherchent des objectifs communs à savoir l'unicité du modèle et du paradigme de modélisation qui permettront aux modèles d'interagir et de s'influencer.

Ainsi nous abordons dans le chapitre suivant d'autres types de méthodes qui formalisent cette intégration pour mettre en œuvre de manière formelle un modèle thématique composé de modèles issus de disciplines différentes.

Chapitre 3

Le couplage pour modéliser des systèmes complexes spatiaux

Sommaire

3.1	Introduction	49
3.2	Définitions et utilités du couplage	50
3.2.1	Définitions du couplage	50
3.2.2	Avantages du couplage	51
3.3	Éléments de couplage	51
3.3.1	Types de couplage	51
3.3.2	Difficultés de couplage	52
3.3.3	Niveaux de couplage dans le processus de modélisation-simulation	54
3.4	Facteurs spatio-temporels dans le processus de couplage	55
3.4.1	Des méthodes de changement des échelles spatiales	55
3.4.2	Des méthodes de changement des échelles temporelles	60
3.5	Approches et plateformes de couplage des modèles	62
3.5.1	Utilisation des agents comme médiateurs de couplage	62
3.5.2	Couplage par intégration des modèles	65
3.5.3	Formalismes de couplage	67
3.5.4	Plateformes de couplage	69
3.6	Positionnement et critiques	71

3.1 Introduction

Les travaux qui cherchent à intégrer les différents moyens de modélisation, dont font partie les approches de couplage, se multiplient [Dub04]. En effet, il devient de plus en plus évident qu'il est difficile de limiter un modèle complexe dans un cadre uniforme de conception. Ce qui pousse beaucoup de chercheurs à opter pour une représentation multi-formes d'un système hétérogène intégrant des solutions mixtes [Vil01]. Ceci permet d'enrichir l'expérience de modélisation et d'avoir une meilleure compréhension des systèmes complexes, en particulier les systèmes complexes spatiaux.

Ce chapitre traite donc des différentes difficultés relatives à la mise en place d'un modèle de couplage. Nous commencerons par présenter les différentes définitions trouvées dans la littérature pour cadrer ce terme. Concernant les problématiques rencontrées lors d'une démarche de couplage, nous les présenterons sous forme de contraintes en termes de réutilisation, d'hétérogénéité, d'interopérabilité, de modularité et de différence d'échelles spatiales et temporelles [Sie11]. D'autres travaux proposent également de structurer l'ensemble des questions à traiter lors du couplage en plusieurs niveaux : le niveau conceptuel, le niveau sémantique, le niveau syntaxique, le niveau dynamique et le niveau technique [TM03]. Nous passons ensuite en revue les approches existantes de couplage de modèles, leurs classifications, leurs avantages et leurs limites. Ainsi ce chapitre a pour but de comprendre comment cette problématique de couplage a été traitée dans les travaux existants afin de pouvoir remédier aux limites identifiées et proposer de nouvelles réponses.

3.2 Définitions et utilités du couplage

Le caractère pluridisciplinaire de certaines dynamiques nécessite souvent de prendre en compte l'interinfluence simultanée de plusieurs modèles [CGGG03] qui intègrent des formalismes hétérogènes et des niveaux d'abstraction différents pour capturer la complexité naturelle du système à modéliser [DGG02]. Ceci justifie la tendance du couplage en matière de modélisation qui remplace petit à petit les modèles uniformes et uniques. Dans cette section nous expliciterons davantage la notion du couplage en mettant l'accent sur les avantages de ce type de démarche.

3.2.1 Définitions du couplage

Ainsi une approche de couplage consiste à définir la manière dont vont être associés les modèles qui représentent chacun une dynamique particulière du système complexe à modéliser [CGGG03]. Le couplage constitue un cas particulier de modélisation qui cherche à créer un modèle pour répondre à une question [Sie11]. Si la modélisation "classique" ne crée qu'un seul modèle, le couplage représente le système étudié par un ensemble de modèles pour créer le multi-modèle [ZO86], [FZ92]. On peut parler de couplage dès lors que nous faisons interagir au minimum deux modèles qui peuvent fonctionner de façon indépendante [Fia01]. Une démarche de couplage est généralement adoptée lorsque l'on se trouve dans l'un des deux cas suivants [Fia01] :

- Il peut arriver que le problème à modéliser nécessite la prise en compte de plusieurs niveaux de détails (lorsque le processus étudié est actif sur une région très hétérogène, par exemple) et que le meilleur modèle approchant le système est une association de différents modèles déjà existants. Dans cette démarche de couplage, l'objectif est de coupler différents modèles de processus chargés de résoudre la même question avec des niveaux de détails différents ;
- La démarche de couplage peut également être envisagée lorsque la question à laquelle on souhaite répondre est une question globale (le processus que l'on veut étudier est la résultante d'un enchevêtrement de processus) ou complexe dont les différentes composantes ont fait l'objet de **modèles spécialisés** que l'on souhaite faire coopérer dans un modèle qui les intègre. C'est en général le problème posé par les recherches pluridisciplinaires, où les phénomènes se complexifient et requièrent un haut degré d'expertise dans chacun des composants du couplage.

Dans la pratique, le couplage de modèles est une problématique que l'on rencontre dans les milieux de la recherche dans lesquels on doit traiter des questions complexes et où la rapidité de conception de nouveaux produits est une question importante (les milieux industriels, écologiques, climatiques, et de la planification urbaine) [Fia01]. Ainsi l'étude des dynamiques urbaines constitue un bon exemple de système complexe spatial qui montre l'intérêt du couplage dans l'intégration et l'interaction entre les différents facteurs sociaux tels que la démographie, la technologie, l'économie, les institutions politiques et sociales, la culture, les croyances et les comportements [AGG⁺01].

3.2.2 Avantages du couplage

Ce type de modélisation permet à des experts appartenant à différentes disciplines de construire un modèle avec des matériaux théoriques qui n'ont pas toujours été conçus pour co-exister [AGG⁺01]. L'avantage de cette approche est donc de capitaliser des modèles validés dans le passé au lieu de les redévelopper. Ceci augmente la puissance descriptive du modèle et permet d'avoir une autre vue sur le système, en espérant à la fois un moindre risque d'erreur et une construction plus rapide du modèle de simulation [AGG⁺01]. Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs modèles facilite l'interaction entre les paramètres et les acteurs du système et permet aux processus de s'exécuter avec des pas de temps et des niveaux d'abstraction différents [AGG⁺01].

Ainsi en spécifiant les liens entre les modèles, toute approche formelle de couplage facilite la reproduction et la validation des résultats. Cependant, la réutilisation des modèles est limitée par la nécessité de réécrire ou d'encapsuler les modèles pour pouvoir les coupler. Dans la section suivante, nous explicitons les différents types de couplage ainsi que les difficultés relatives à cette problématique. Nous pouvons résumer l'ensemble de ces contraintes en trois mots clés : hétérogénéité, interoperabilité, multi-échelles.

3.3 Éléments de couplage

Le récent intérêt porté par les chercheurs à ce mode de modélisation particulier qu'on appelle couplage de modèles a donné naissance à plusieurs types de couplages. Par ailleurs, pour obtenir une meilleure représentation et une interaction réelle entre les modèles à coupler, il existe des contraintes ainsi que des niveaux de couplage à prendre en considération. Ainsi les typologies, les contraintes et les niveaux de couplage seront détaillés dans les sections suivantes.

3.3.1 Types de couplage

Dans la littérature, les méthodes de couplage sont classées selon le degré de couplage avec lequel les modèles sont assemblés les uns aux autres et la façon dont se déroulent les interactions. Nous nous intéresserons à cinq formes de couplage : le couplage faible, le couplage fort, le couplage moyen, le couplage intégral et le couplage coopératif. On parle donc de [Fia01] :

Couplage faible : (appelé aussi couplage lâche) lorsque les modèles restent indépendants et que l'échange se fait via des transferts uni-directionnels de données où les résultats d'un modèle sont utilisés en entrée (comme paramètres) d'un deuxième modèle (Fig. (a) 3.1). Ainsi seules les données sont échangées mais les modèles restent indépendants les uns des autres. Ce type de couplage est généralement statique et n'autorise que la représentation spatiale des états initiaux et finaux des modèles. Cependant, il est possible de mémoriser des états intermédiaires pour les transmettre soit périodiquement, soit à l'occasion d'événements d'intérêt particulier au cours de

la session [Zun]. Ceci pose le problème du changement et de la visualisation dynamiques des paramètres d'exécution des modèles au cours de la simulation.

Couplage fort : (appelé aussi couplage étroit) quand les modèles partagent une même base de données à travers un module d'interface qui permet de gérer l'intégrité des données utilisées par les modèles (Fig. (b) 3.1). Ces modèles peuvent rester indépendants mais ils s'influencent l'un et l'autre à travers des échanges dynamiques massifs de données. Ce couplage remédié aux inconvénients du premier, en assurant la visualisation dynamique des changements grâce à la base des données commune aux modèles à coupler. Cependant, l'implantation de ces fonctionnalités nécessitent des développements redondants dans un environnement peu adapté.

Couplage moyen : (appelé aussi parallélisation) s'il s'agit de coupler des modèles informatiques avec des modèles mathématiques [Kan12] (Fig. (d) 3.1). Ce couplage est fréquemment utilisé dans les travaux qui traitent des phénomènes complexes, où le modèle mathématique aide à calibrer les données du modèle informatique (pour l'optimisation par exemple) et à le valider (à travers des analyses statistiques par exemple).

Couplage intégral : (ou hiérarchique) si les modèles sont modifiés afin d'être adaptés les uns aux autres et assurer la compatibilité parfaite du couplage. Ainsi la notion d'intégration évoquée dans le chapitre précédent peut être considérée comme une forme de couplage. L'ensemble des modèles formera un super-modèle unique réécrit à partir de plusieurs modèles (Fig. (e) 3.1). Il s'agit donc de définir une relation de décomposition entre le modèle et les sous-modèles interconnectés qui le composent [Ram06].

Couplage coopératif : qui répond aux limites du couplage étroit et peut être direct ou indirect. Il s'agit de couplage coopératif direct [ME05] quand les deux modèles restent indépendants et utilisent une liaison client/serveur pour interagir (Fig. (c) 3.1). Ce couplage peut devenir dynamique s'il y a une bonne compatibilité des modèles. La mise en compatibilité des modèles peut être prise en charge par un système médian on parle dès lors de couplage coopératif indirect.

Ces différents types de couplage soulèvent un bon nombre de difficultés à gérer dont nous pouvons citer : la modularité, l'interopérabilité, l'hétérogénéité des modèles. Nous reprenons ces contraintes avec plus de détails dans les sections suivantes.

3.3.2 Difficultés de couplage

Le processus de couplage soulève des difficultés d'ordre conceptuel tels que : la synchronisation et la gestion du temps, les différentes échelles temporelles et spatiales ainsi que les problèmes techniques tels que : la compatibilité des plateformes de simulation, l'interfaçage entre les applications, etc. Dans ses travaux sur le couplage, [Sie11] présente des contraintes de couplage en termes de :

Réutilisation : il existe beaucoup de modèles dans la littérature qui seraient intéressants à réutiliser pour modéliser une autre organisation spatiale. Cependant, quand il s'agit de couplage, ces modèles ne sont pas forcément conçus pour recevoir ou envoyer des données vers d'autres modèles. La réutilisation des modèles nécessite souvent la réécriture ou l'encapsulation des modèles pour pouvoir les coupler. Par conséquent il est important de prévoir un minimum de modifications à faire sur les modèles pour pouvoir les corrélérer avec les autres modèles lors de l'opération du couplage.

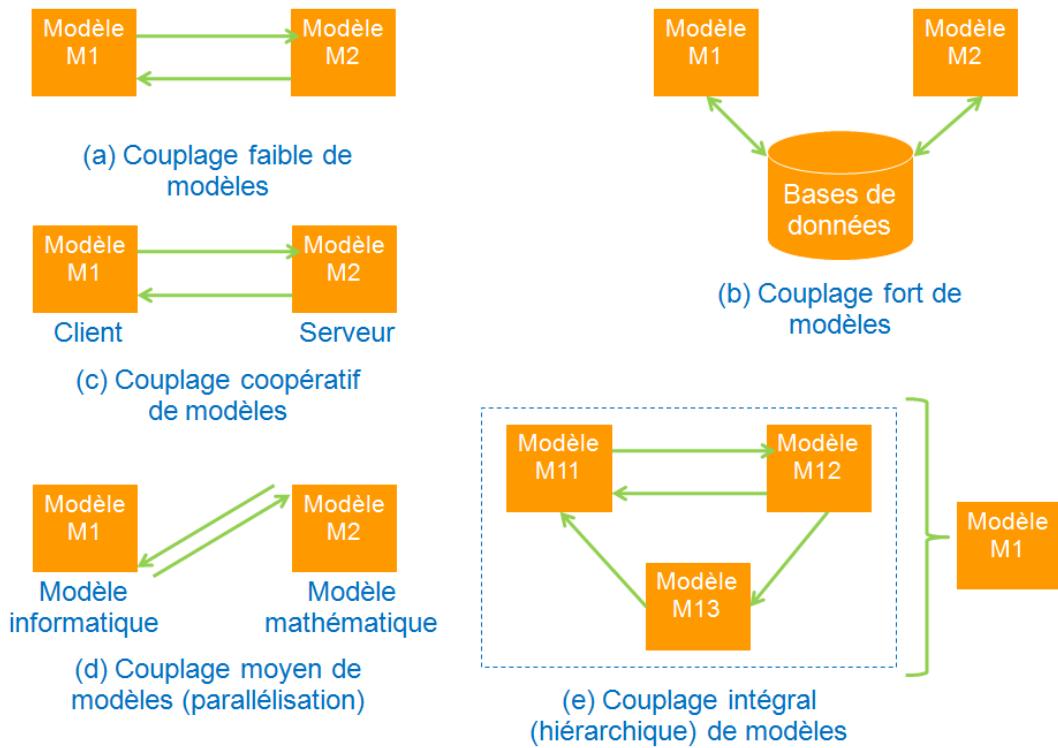


FIGURE 3.1 – Différents types de couplage

Modularité : la modélisation des systèmes complexes nécessite souvent le changement des modèles pour faciliter la transformation du système. Dans un processus de couplage le modéliste doit pouvoir choisir entre plusieurs modèles existants dans la littérature. La modularité est une contrainte qu'il faut donc prendre en considération pour pouvoir changer facilement les modèles élémentaires à coupler.

Interopérabilité : le terme d'interopérabilité vise à permettre à plusieurs sources d'information hétérogènes de partager et de contrôler les échanges des données. En effet, le fait de réutiliser des modèles dans la littérature a pour avantage de revaloriser l'existant mais ne permet pas de choisir le formalisme et les paradigmes utilisés dans ces modèles. Il va falloir donc faire interagir des modèles différents de façon synchronisée et simultanée lors de l'établissement des canaux de communication entre les modèles. Dans le cadre du couplage, ces interactions peuvent se faire selon un schéma fédéré de la base des données ou à travers des médiateurs chargés de contrôler les accès et de résoudre les conflits entre les données des différentes sources.

Hétérogénéité : quand une même réalité dispose de plusieurs représentations hétérogènes ceci peut poser des problèmes lorsque l'on s'attaque à une question de couplage de modèles. En effet, les modèles utilisés dans le processus de couplage utilisent des langages différents et des formalismes différents pour manipuler leurs variables d'entrée et de sortie. On se trouve donc confronté au problème de cohérence entre des représentations diverses qui se rapportent au même concept. Pour assurer la compatibilité des formalismes, il est souvent nécessaire lors du couplage, d'appliquer des transformations au préalable sur les paramètres et leur unités de mesure pour les traduire dans des systèmes de représentations que les modèles peuvent manipuler et partager

[Fia01].

Différence des échelles des modèles : la modélisation de certaines dynamiques nécessite parfois d'envisager l'utilisation de plusieurs modèles représentant différentes composantes du système complexe étudié qui évoluent à des échelles spatiales et temporelles différentes. Il est donc nécessaire d'être en mesure de gérer ces différences d'échelles afin d'avoir un couplage et des résultats cohérents. Nous reprenons cette contrainte avec plus de détails dans la section (cf. section 3.4).

Pour répondre à ces difficultés, il est important de structurer l'approche de couplage sur différents niveaux allant du couplage de bas niveau jusqu'au couplage plus élaboré où la dynamique des échanges entre modèles intègre la dimension sémantique, dynamique, technique, etc.

3.3.3 Niveaux de couplage dans le processus de modélisation-simulation

Un couplage de modèles, si on le veut complet, doit se faire tant sur les niveaux conceptuel, sémantique, syntaxique qu'au niveau dynamique et technique [Sie11], [TM03] qu'on détaillera ci-dessous :

Niveau conceptuel : le niveau conceptuel se concentre sur l'architecture du modèle de couplage afin de spécifier la façon dont les modèles (vus comme des boîtes noires) vont interagir ensemble. Le niveau conceptuel aborde les questions de métamodélisation comme "Quelle représentation du métamodèle doit être utilisée pour répondre aux questions sur un système particulièrement complexe ?" ou "est-ce que la représentation du métamodèle est suffisamment générique pour être appliquée à d'autres types de systèmes complexes ?".

Niveau sémantique : à ce niveau, le modélisateur doit définir la sémantique des interactions des différents modèles élémentaires qui constituent le métamodèle de couplage. Le niveau sémantique traite des questions posées sur le système étudié comme "ce que doit représenter chacun des modèles ?", "Comment les modèles interagissent-ils ?", "Comment un même objet est représenté dans différents modèles ?" Ou "que signifie le passage d'un niveau d'abstraction à un autre ?". A ce niveau le graphe d'interaction permet au modélisateur de définir comment les modèles perçoivent les informations échangées entre eux.

Niveau syntaxique : au niveau syntaxique, on spécifie la formalisation du métamodèle de couplage qui constitue le moteur du processus de couplage. Comme les modèles à coupler proviennent de différents domaines scientifiques, les formalismes de ces modèles peuvent être différents. Si les modèles utilisent le même formalisme on parle de couplage homogène. Dans le cas contraire il s'agit de couplage hétérogène où le métamodèle doit prendre en compte les différences des représentations des paramètres partagés par les modèles comme le changement d'états des entités modélisées, le changement de l'espace ou du temps.

Niveau dynamique : le niveau dynamique concerne l'exécution du métamodèle. Il est nécessaire à ce niveau de définir l'ordre dans lequel les modèles sont exécutés ainsi que leurs politiques d'exécution. En effet, faire interagir des modèles interopérables signifie que ces derniers peuvent modifier simultanément les mêmes paramètres. Il est alors nécessaire de gérer la simultanéité des actions, de respecter les relations de causalités si la simulation est distribuée et de résoudre les éventuels conflits d'accès des modèles.

Niveau technique : le niveau technique porte sur les aspects de mise en œuvre des simulateurs à coupler. La discussion doit porter sur la distribution (ou centralisation), la robustesse, la fiabilité et l'efficacité de la simulation.

Nous nous intéressons dans la section suivante à l'aspect multi-échelles des systèmes complexes spatiaux. Plus particulièrement, nous allons présenter quelques techniques utilisées dans la littérature pour gérer la différence des échelles temporelles et des échelles spatiales entre les modèles à coupler.

3.4 Facteurs spatio-temporels dans le processus de couplage

La modélisation de systèmes complexes se doit de prendre en compte les diverses échelles qui rendent compte des phénomènes étudiés (voir section 1.2.2 page 7). Ce qui se traduit par la nécessité de développer des méthodes pour la gestion de la différence des échelles des dynamiques qui représentent un système complexe donné. Ainsi de nouvelles architectures ont récemment apparu pour représenter des systèmes multi-échelles.

En effet, dans un processus de couplage, le modélisateur peut être souvent confronté à un problème de changement d'échelles étant donné qu'un même objet du monde peut bénéficier de diverses représentations d'un modèle à l'autre, en fonction de la discipline à laquelle il appartient. Quand on parle de différences d'échelles entre modèles il s'agit, la plupart du temps, d'entités manipulées par les modèles qui se situent à des niveaux différents le long de l'échelle spatiale et temporelle [GBMD10]. Comme il s'agit d'une des contraintes majeures à résoudre dans une opération de couplage, nous allons consacrer cette section pour faire le tour des méthodes déjà utilisées pour gérer ce type de contrainte.

3.4.1 Des méthodes de changement des échelles spatiales

Dans cette section, nous avons délibérément choisi de présenter les méthodes de changement de niveaux d'abstraction au sein d'un même modèle avant de présenter les méthodes de changement d'échelles spatiales entre des modèles différents dans le cadre du couplage et ce dans le but d'avoir le maximum d'idées et de paradigmes utilisés pour gérer les passages d'une échelle à une autre.

3.4.1.1 Des méthodes de changement de niveaux d'abstraction dans un même modèle

Quand un modèle manipule des entités à différents niveaux d'abstraction, on parle de modèle multi-niveaux. Dans son analyse des aspects multi-niveaux d'un modèle, [QGHL10] propose une classification des modèles multi-niveaux en plusieurs catégories : modèles à spécification multi-niveaux statique et modèles multi-niveaux à réification dynamique. En effet, il est possible de spécifier les niveaux des entités simulées de façon statique ou dynamique [QGHL10].

- **La spécification statique des niveaux d'abstraction :** les méthodes qui se basent sur la spécification statique des niveaux d'abstraction des entités simulées définissent pour chaque entité une échelle qui reste la même tout au long de la simulation [MFT08]. Parmi ces modèles à spécification statique des multi-niveaux nous pouvons citer : le modèle à base d'agents vectoriels multi-échelles [Sil10], le modèle fractal de Fringe Belts [Duc05], l'approche Agent-Pore-Solid-Fractal (APSF) [MCD⁺08], le modèle hiérarchique SWARM [GBD09] à base d'encapsulation figée d'agents ;

- **La spécification dynamique des niveaux d'abstraction :** quand la spécification des niveaux d'abstraction des entités simulées est dynamique, il est nécessaire d'implémenter des mécanismes de type "loupe dynamique" [QGHL10] qui permettent d'augmenter ou de diminuer le degré de résolution spatiale sur des zones critiques tout au long de la simulation. Pour conserver le plus haut degré de détail, il faut faire des adaptations continues des niveaux d'abstraction en fonction des besoins. Dans cette catégorie de modèles nous pouvons citer : le modèle de changement dynamique de niveaux d'abstraction "LOD" [NFC11], le modèle PADAWAN [PMKP10] à base d'encapsulation dynamique d'un environnement par des agents ;
- **La réification dynamique des structures émergentes :** maintenant si les objets de niveaux différents sont dans le même espace de modélisation et peuvent interagir ensemble, ceci peut entraîner une plus grande complexité dans la mesure où il va falloir détecter l'apparition de structures émergentes et vérifier que les conditions de maintien de ces structures émergentes en fonction de leurs interactions avec les autres entités sont bien existantes. Cette démarche "bottom-up" devient une nouvelle approche de gestion des échelles des systèmes complexes spatiaux qui a été utilisée dans des modèles comme le modèle de L. Fashe et al. [FWG98] où le comportement global du système est le produit du comportement élémentaire des agents et le modèle SIMBOGOTA [Qui07] à base de réification dynamique des structures artificielles construites par la classification des objets semblables du niveau micro en groupes homogènes.

Dans ce paragraphe nous avons passé en revue différentes façons d'appréhender plusieurs niveaux d'observation et de comparer les logiques de répartition d'un phénomène suivant différentes partitions de l'espace dans le cadre d'une étude (voir tableau Tab. 3.1). Dans ces modèles, la différence d'échelles a été gérée chaque fois par des méthodes adaptées au contexte du modèle qui permettent de spécifier les interactions entre les différents niveaux d'abstraction d'un même modèle (voir tableau Tab. 3.1). Cependant comme nous cherchons à coupler des modèles qui évoluent à des échelles spatiales différentes, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux méthodes utilisées pour gérer cette différence d'échelles entre modèles lors du couplage.

Catégorie des méthodes	Principe des méthodes	Avantages	Limites	Noms des modèles
Méthodes de changement des niveaux	La spécification statique des niveaux d'abstraction	Manipulation et attribution facile des niveaux d'abstraction	Pas de possibilité d'ajout ou de changement des niveaux d'abstraction existants	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle à base d'agents vectoriels multi-échelles [Sil10], - le modèle fractal de Fringe Belts [Duc05], - la plateforme SWARM [GBD09]
	La spécification dynamique des niveaux d'abstraction	Faire des changements continuels des niveaux d'abstraction en fonction des besoins	Nécessité de faire des adaptations pour toujours conserver le plus haut degré de détail sur les zones d'intérêt	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle de changement dynamique de niveaux d'abstraction "LOD" [NFC11], - le modèle PADAWAN [PMKP10]
La réification dynamique des structures émergentes		Détection de nouvelles structures émergentes qui résultent des interactions entre les constituants de niveau inférieur du système	Une plus grande complexité due à la nécessité de vérifier les conditions de maintien des structures émergentes	<ul style="list-style-type: none"> le modèle de L. Fashe et al. [FWG98], - le modèle SIMBO-GOTA [Qui07]

TABLE 3.1 – Classification de certaines méthodes de gestion de la différence des échelles spatiales dans un même modèle

3.4.1.2 Des méthodes de gestion de la différence des échelles des modèles

Nous cherchons dans cette section à passer en revue les différentes techniques adoptées pour gérer la différence des échelles spatiales lors d'un processus de couplage. Cette étude nous a permis de dégager les différentes catégories de modèles qu'on présente dans ce qui suit :

- **Décomposition de l'espace partagé** : dans ce cadre, une des méthodes utilisées pour gérer les différences d'échelles des modèles dans le cadre du couplage consiste à décomposer l'environnement de la simulation en un ensemble d'entités à des niveaux d'abstraction différents. Un ensemble de fonctions de conversion seront associées à ces entités pour adapter les échelles des modèles aux échelles des entités spatiales sur lesquelles travaille le modèle ou aux échelles des autres modèles qu'on cherche à coupler. Nous pouvons citer dans cette catégorie le métamodèle AA4M [Sie11] à base d'artefact de couplage, le modèle DS [DPBL07] où l'environnement est divisé en agents allant du niveau micro au niveau macro, le modèle Osiris [Fia01] où l'utilisateur définit des classes d'objets à des échelles différentes ;
- **Les systèmes holoniques** : l'approche holonique offre une méthode prometteuse pour le développement des systèmes complexes multi-échelles [CGG07]. Pour modéliser cette architecture hiérarchique, les holons sont considérés comme des entités atomiques et autonomes ou comme des organisations d'holons composées et récursives [RGH⁺06]. Ces systèmes peuvent être utilisés dans le cadre du couplage afin d'encapsuler des modèles ayant des échelles spatiales différentes par des holons pour atteindre l'échelle souhaitée par chaque modèle et avoir des points de vue différents sur le système. Ainsi les interactions entre les holons permettront de faire interagir les modèles à différentes échelles spatiales. Parmi les modèles qui utilisent les systèmes holoniques, on peut citer les métamodèles multi-agents organisationnels holoniques ASPECS [CGG07] et Crio [Gau07] qui permettent de spécifier des entités avec différents niveaux de granularité ;
- **Le regroupement des modèles selon leurs échelles** : d'autres méthodes de transfert d'échelle pour le couplage multi-échelles sont basées sur le principe de classification des échelles par ordre hiérarchique. En effet, dans son analyse des aspects multi-échelles d'une simulation [QGHL10] explique, qu'en général, pour gérer la différence des échelles entre des modèles indépendants à coupler, la procédure utilisée consiste à récupérer les sorties des modèles d'échelle supérieure pour qu'elles deviennent des paramètres globaux pour les modèles d'échelle spatiale inférieure tant que les sorties des modèles de petite échelle servent d'entrée aux modèles ayant une plus grande échelle. Dans cette catégorie de modèles on peut citer, le modèle agrégé [SPTD98] qui constitue un ensemble de modèles séparés en plusieurs niveaux d'abstraction. Ainsi si le modèle de bas niveau est un composant du modèle de haut niveau, il est intégré dans le modèle de haut niveau. Nous citons également le modèle écologique silvo-pastoral [Vil01] où le système multi-agents intervient seulement pour combiner les différents modèles en reliant les échelles égales ensemble.

Catégorie des méthodes	Principe des méthodes	Avantages	Limites	Noms des modèles
Méthodes de gestion de la différence des échelles spatiales des modèles à coupler	Décomposition de l'espace partagé	La gestion des échelles spatiales se fait au niveau de l'espace lui même	L'ajout d'un modèle avec une échelle différente peut nécessiter une nouvelle organisation de l'espace	<ul style="list-style-type: none"> - le métamodèle AA4M [Sie11], - le modèle DS [DPBL07], - le modèle Osiris [Fia01]
	Les systèmes holoniques	Utilisation des holons pour atteindre dynamiquement l'échelle souhaitée par chaque modèle	L'information peut prendre un temps plus ou moins important pour remonter et descendre dans le système holonique	<ul style="list-style-type: none"> - le métamodèle ASPECs [CGG07] - le métamodèle CRIo [Gau07]
	Le regroupement des modèles selon leurs échelles	Le regroupement des modèles appartenant à la même échelle assure une meilleure gestion de la granularité spatiale lors du couplage	Nécessité de déterminer de la bonne granularité pour assurer la classification des échelles des modèles par ordre hiérarchique	<ul style="list-style-type: none"> - le modèle agrégé [SPTD98] - le modèle écologique silvo-pastoral [Vil01]

TABLE 3.2 – Classification de certaines méthodes de gestion de la différence des échelles spatiales des modèles à coupler

Nous nous intéressons dans ce qui suit à un autre type d'hétérogénéité des échelles qui se situe cette fois au niveau temporel. Il s'agit de comprendre comment faire interagir un ensemble de modèles qui évoluent à des échelles temporelles différentes sans générer de conflits ou d'incohérences lors de l'accès aux ressources communes à partager.

3.4.2 Des méthodes de changement des échelles temporelles

La dynamique du processus de couplage est étroitement liée à la gestion des temps d'exécution des modèles à coupler. En effet, en plus de la gestion des échelles spatiales, il est nécessaire de gérer dans un processus de couplage l'ordonnancement des modèles qui peuvent avoir des échelles temporelles différentes. Dans la littérature, on distingue deux principales politiques d'exécution : la simulation cyclique et la simulation événementielle. Le choix de la politique d'exécution est dépendant généralement des besoins modélisateur, lors de la représentation du temps du modèle (discret/continu) [ZKP00] et du formalisme utilisé. L'objectif de la gestion du temps dans le processus de couplage est de veiller à ce que les événements de simulation (ou pas de temps) soient exécutées dans le bon ordre (contrainte de causalité locale). Dans ce qui suit nous nous focaliserons sur les méthodes dédiées à la gestion l'hétérogénéité temporelle dans le cadre d'un processus de couplage. On peut distinguer les catégories suivantes.

- **Alternance des dates d'exécution** : dans ce type de méthodes, l'exécution des modèles se fait de façon alternée. La fréquence attribuée à chaque modèle indique à quel moment celui-ci doit être exécuté [QGHL10]. L'ordonnancement va se faire donc en se basant sur les fréquences d'exécution des modèles. Dans cette catégorie de modèles on peut citer le modèle IRM4MLS [MVD11] où l'ordonnancement est distribué entre les modèles de façon égale sans différenciation par rapport à l'échelle utilisée, le projet ARCHON [JCL⁺96b], le modèle ASIC [BD97] et le système d'ALI [JGW98] où l'attention est portée sur l'ordre des différentes actions à effectuer sans contrôle global de l'ensemble des actions effectuées dans ces différents systèmes à un instant donné ;
- **Encapsulation des agents à l'intérieur d'agents de niveau supérieur** : le principe de l'encapsulation permet une gestion dynamiques des échelles temporelles [QGHL10]. En effet, ces agents à différents niveaux sont associés à des échelles temporelles différentes. Cela impose de privilégier un mode de simulation à événements discrets, ou encore de gérer en parallèle plusieurs ordonnanceurs pour les différents types d'objets simulés. Dans ses travaux, [QGHL10] opte dans son modèle SIMULGOGOTA [Qui07] pour cette gestion des échelles temporelles qui se base sur l'attribution des agents de différents niveaux à des échelles de temps variées ;
- **Réitération des actions des modèles** : dans d'autres travaux la gestion de la différence des échelles temporelles se base sur le principe de réitération des actions du modèle ayant la plus petite échelle jusqu'à atteindre le temps d'exécution du modèle ayant une plus grande échelle de temps. Dans cette catégorie de modèles on peut trouver le modèle PLM [VCW⁺99], le modèle Belouze [Bel96], le modèle AA4MM [Sie11] où certaines opérations relatives à des données de petite échelle sont réitérées plusieurs fois pour pouvoir s'adapter aux données d'une plus grande échelle ;
- **Utilisation d'entités intermédiaires responsables de la gestion du temps** : d'autres méthodes se basent sur l'utilisation d'entités intermédiaires qui jouent le rôle d'ordonnanceurs ou de contrôleur de temps pour gérer le temps des modèles. Cette politique de gestion de temps permet de prendre en considération des pas de temps variables. Dans cette catégorie de modèles, on trouve le modèle Osiris [Fia01] qui se base sur des agents contrôleurs de temps pour assurer la coordination entre les échelles de temps des modèles à coupler.

3.4. Facteurs spatio-temporels dans le processus de couplage

Catégorie des méthodes	Principe des méthodes	Avantages	Limites	Noms des modèles
	Alternance des dates d'exécution	L'alternance des temps d'exécution se fait de façon égale sans tenir compte des échelles temporelles	Nécessité de tenir compte de l'état global du système simulé afin d'assurer sa cohérence globale	- le modèle IRM4MLS [MVD11] - le projet ARCHON [JCL ⁺ 96b] - le modèle ASIC [BD97] - le projet ALL [JGW98]
Méthodes de gestion de la différence des échelles temporelles des modèles à coupler			L'encapsulation peut consommer du temps en plus de l'exécution du temps des modèles	le modèle SI-MULGOGOTA [Qui07]
	Encapsulation des agents à l'intérieur d'un agent de niveau supérieur	Possibilité de changer dynamiquement d'échelles par encapsulation ou désencapsulation des agents		
	Réitération des actions des modèles	Simplicité des fonctions de réitération jusqu'à l'atteinte d'un temps d'exécution plus grand	Absence de gestion dynamique du changement d'échelles temporelles lors du couplage (nécessité d'écrire des fonctions)	- le modèle PLM [VCW+99] - le modèle Belouze [Bel96], - le modèle AA4MM [Sie11]
	Utilisation d'entités intermédiaires responsables de la gestion du temps	Possibilité de prendre en compte des pas de temps non prévus au départ d'une simulation	La panne d'un contrôleur de temps peut perturber le fonctionnement des contrôleurs de temps inter-connectés	le modèle Osiris [Fia01]

TABLE 3.3 – Classification de certaines méthodes de gestion de la différence des échelles temporelles des modèles à coupler

En prenant en considération ces spécificités et ces contraintes relatives aux systèmes complexes spatiaux, de nombreux travaux se sont intéressés à la problématique de couplage. Chacun d'eux a abordé le couplage d'un point de vue différent en adoptant le principe et le paradigme le mieux approprié au domaine de modélisation auquel il s'intéresse. Nous passons en revue dans la section suivante quelques plateformes et approches de couplage existantes afin d'identifier leurs avantages et leurs limites pour construire notre propre approche de couplage.

3.5 Approches et plateformes de couplage des modèles

De nouvelles approches, techniques et théories ont été développées dans le domaine de la modélisation et la simulation pour répondre aux besoins des applications informatiques qui traitent des systèmes de plus en plus complexes. Dans cette section nous présentons quelques formes élaborées de couplage. Nous nous focaliserons sur les approches multi-agents illustratives du couplage à base d'agents. Dans un second temps, nous nous intéresserons également à d'autres modèles non orientés agents qui exploitent d'autres formes de couplage. Nous finirons par les plateformes de couplages qui offrent des solutions de couplage de simulateurs hétérogènes.

3.5.1 Utilisation des agents comme médiateurs de couplage

Nous trouvons dans la littérature, beaucoup de modèles qui proposent un "*couplage intelligent*" à base d'agents médiateurs [ST02]. En effet, dans cette démarche de couplage, les médiateurs sont chargés de résoudre les problématiques et les contraintes relatives au processus de couplage [Fia01]. Ces médiateurs peuvent être formalisés avec différents paradigmes entre autre le paradigme agent. Dans ce qui suit, nous allons présenter certains modèles qui utilisent des systèmes multi-agents bâtis dans le but de coupler ou de faire coopérer des modèles indépendants.

Le modèle DECA

DECA [BYCA98] constitue un exemple de couplage à base d'agents. En effet, il s'agit d'une approche basée sur une architecture d'interopérabilité de systèmes d'information hétérogènes formée de trois types d'agents : les agents wrapper qui assurent les fonctions d'encapsulation des bases locales et se chargent du traitement des requêtes locales, les agents de coopération (AC) [BYCA98] qui jouent le rôle de médiateurs, l'agent ontologie définit le vocabulaire commun utilisé par les agents AC pour s'échanger des requêtes sans avoir à travailler sur un schéma global. Dans cette solution, le couplage consiste à définir des correspondances entre les différentes relations (appelées concepts), les attributs et les valeurs par l'utilisation de trois prédictats stockés dans une base de données partagée. Le couplage consiste donc à mettre en relation les différents schémas de données pour trouver l'objet de l'interopérabilité entre les modèles.

Le modèle ARCHON

ARCHON (ARchitecture for Cooperative Heterogeneous ON-line systems) [JCL⁺96b] a été lancé dans le cadre d'un projet pour proposer une méthode et une architecture de couplage de logiciels industriels à base de systèmes multi-agents. Les agents sont utilisés pour encapsuler les logiciels préexistants. Chaque agent est composé d'un système intelligent "IS" regroupant l'ensemble des tâches de l'agent décrites par des noms spécifiques à leur environnement d'exécution. Il dispose également d'un module de gestion de l'information appelé "AIM". Pour dialoguer avec les autres agents l'agent ARCHON [JCL⁺96b] dispose d'une couche nommée "ARCHON Layer-

AL" pour gérer les connaissances du domaine et d'une interface AL-IS pour faire la traduction entre la tâche et son nom ARCHON. Le métamodèle ARCHON [JCL⁺96b] a été utilisé dans plusieurs environnements industriels tels que les systèmes d'électricité du nord de l'Espagne Iberdrola ou dans le projet de l'institut de recherche européen en énergie nucléaire pour contrôler et diagnostiquer les pannes dans l'accélérateur de particules "Proton Synchroton".

Le modèle ASIC

Le modèle ASIC (Architecture for Social and Individual Control) [BD97] utilise une architecture générique multi-agents de type BDI (Belief-Desire-Intention). Le but du projet est de construire des systèmes intégrés de vision (SIV) et en particulier deux systèmes de vision (Multi-Agents system for Visual Integration - MAVI et système Multi-AGents pour l'Interprétation et la Compréhension de scènes-MAGIC). L'architecture ASIC [BD97] peut être considérée comme une architecture de couplage de fonctions concernant le traitement d'image. Chaque agent ASIC sera responsable d'une fonction de traitement dotée d'un langage du domaine d'application. Pour s'envoyer des messages de contrôle social et de coopération entre les agents, les agents ASIC vont utiliser un langage d'interaction propre (le langage commun L). Ces interactions entre agents qui constituent le cœur du couplage sont très formalisées. En effet, dans le modèle ASIC [BD97] chaque agent dispose d'une copie de l'ensemble (Pr) qui définit les protocoles d'interactions possibles au niveau de chaque agent. Chaque fois qu'un agent reçoit un message il consulte sa copie locale et choisit le protocole le mieux adapté en fonction de son but.

Le modèle ALI

Dans le modèle ALI (Agents Logiciels Intelligents) [JGW98], l'architecture proposée (Fig. 3.2) vise à coupler des systèmes d'aide à la décision (SAD) en utilisant des agents logiciels intelligents. Chacun de ces systèmes d'aide à la décision dispose d'une description détaillée stockée dans un module spécifique appelé "self-model" et sera instancié par un Agent Logiciel Intelligent [Sie11]. Le couplage sera mis en oeuvre du fait grâce à la notion de langage commun à la notion de message et de structure de messages échangés entre agents. L'intégration de nouveaux modèles et la coopération entre les agents ALI est conforme aux principes de communication de la norme ISO où la description des messages envoyés entre agents se fait avec le langage ASN.1 (Abstract SyntaxNotationOne) et où les codages de messages sous forme binaire transmis sur le réseau se fait selon le standard BER (Basic Encoding Rules). Le modèle d'ALI [JGW98] dispose également d'une couche de communication chargée de la réception et de l'envoi des messages entre agents. Pour déterminer sa prochaine action l'agent applique un algorithme de communication à quatre niveaux.

Le modèle DS

Le modèle DS [DPBL07], utilise également le système multi-agents pour le couplage des dynamiques sociale et spatiale relatives au contexte de l'île de la Réunion. Chaque modèle utilise un ensemble d'agents pour représenter la dynamique à laquelle il est associé tout en tenant compte de l'évolution de l'autre modèle. Ainsi le modèle démographique est composé de trois types d'agents : l'agent terrain, l'agent sous-région et l'agent zone. Le modèle d'aménagement de l'espace urbain quant à lui est composé de trois agents : l'agent agricole, l'agent naturel et l'agent urbain. Cet échange entre les agents des deux modèles ne se fait pas directement mais à travers l'espace. Les sorties de ces modèles et par la suite les résultats des calculs des agents sont intégrés au niveau de l'espace à des échelles différentes. Les agents prennent en considération les nouvelles informations lues de l'espace avant chaque cycle de vie. Les agents

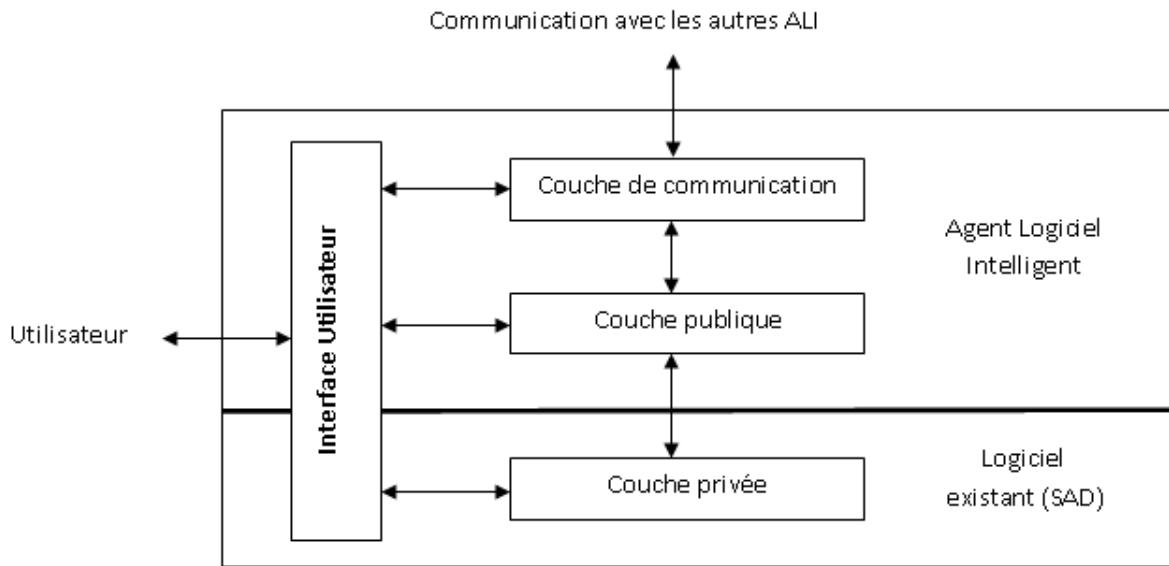


FIGURE 3.2 – Le modèle d’ALI (source : [JGW98])

des modèles pour assurer l’échange des données à travers l’espace. Ainsi, comme le montre la figure (Fig. 3.3), ces deux dynamiques ont besoin l’une de l’autre pour fonctionner. Bien que cette méthode propose une approche de couplage qui fonctionne bien dans son contexte, elle reste peu générique puisqu’elle ne permet pas de coupler des modèles autres que les modèles SMA.

Le modèle OSIRIS

Ce modèle OSIRIS [Fia01], a pour but de coupler des modèles conçus indépendamment pour l’étude d’une région irriguée du Sénégal. Ainsi le couplage consiste à définir les différents éléments de ce système pivot sur lequel vont agir les différents processus. Ce système pivot est fondé sur un modèle d’agent, il s’organise dans une architecture en 3 couches [Fia01]. Dans la couche agent, on trouve l’agent de contrôle qui a pour rôle de maintenir la cohérence entre les différents processus indépendants du système. En effet, chaque modèle est encapsulé par un processus qui est associé à un agent de contrôle. La notion de processus permet ainsi d’avoir une interface pour manipuler différents modèles représentant un phénomène considéré.

Les agents de contrôle évoluent de façon indépendante tout en prenant en considération les notifications qu’ils reçoivent de leurs accointances suite à toute modification d’un attribut d’une entité quelconque lors de l’exécution d’un modèle. Cette notion d’accointances permet aux agents de contrôle de vérifier leur base de règle et éventuellement procéder à des réajustements. L’agent contrôleur de temps a pour rôle quant à lui d’expliquer le temps virtuel dans lequel se déroulent les différents modèles et par la suite le manipuler. Cet agent permet donc de maîtriser la variabilité et la diversité des rythmes, le système doit pouvoir modifier dynamiquement le pas de temps de la simulation (ou modifier la manière dont les événements sont générés). Seules les actions sûres sont autorisées.

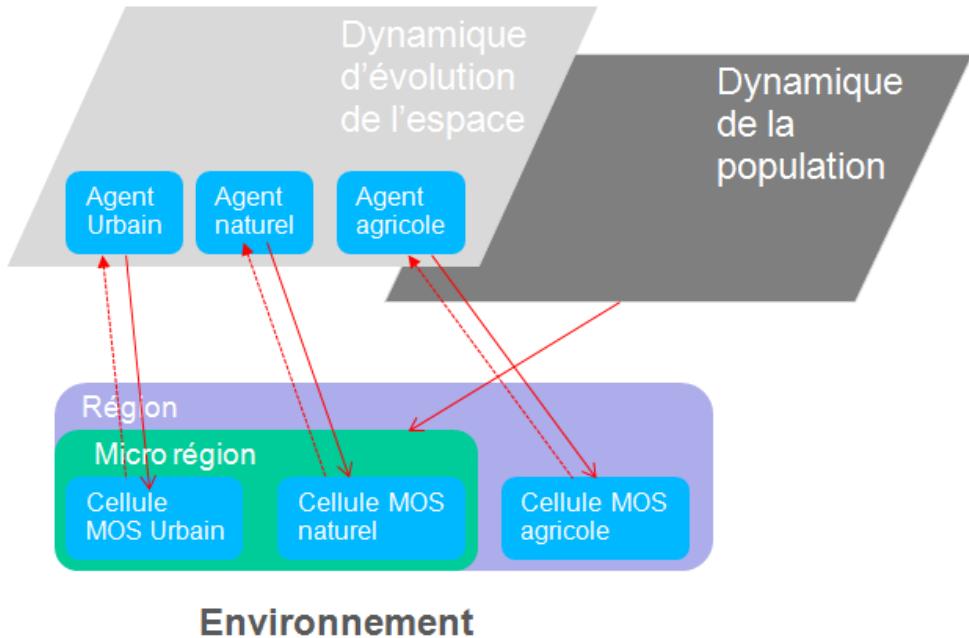


FIGURE 3.3 – Architecture du modèle DS (source : [DPBL07])

Le métamodèle AA4MM

Il s'agit [Sie11], comme présenté précédemment, d'un métamodèle de multimodélisation orienté agent, basé sur les artefacts qui permet de coupler des modèles et des simulateurs existants. Ce métamodèle a été utilisé dans le domaine des réseaux ambients pour le couplage d'un modèle de comportements des usagers (déplacements, évitement d'obstacles, utilisation du réseau, etc) avec un modèle de réseau (propagation des messages). Ce métamodèle propose une structuration méthodologique du couplage en cinq niveaux allant du niveau conceptuel, sémantique, syntaxique, dynamique jusqu'au niveau technique. Cette structuration a pour but de satisfaire les contraintes de couplage identifiées précédemment à savoir : la modularité, la réutilisation, l'hétérogénéité, l'interopérabilité et la gestion des échelles. Pour cela, le métamodèle utilise les concepts de Agents et Artefacts (A & A) défini dans [RVO07]. Le métamodèle distingue entre deux types d'artefacts : artefact d'interface et artefact de couplage où l'artefact constitue une entité passive visible et utilisable par les agents. Ainsi le modèle se base sur un ensemble d'artefact qui ne fait que réagir aux demandes des agents pour gérer le couplage à différents niveaux comme le montre la figure (Fig. 3.4).

Cette focalisation sur les méthodes de couplage orientées agents nous permet de voir des exemples de couplage qui peuvent être utiles pour notre approche de couplage par laquelle nous cherchons à spécifier des médiateurs des échanges entre modèles multi-échelles. Dans ce qui suit nous allons nous intéresser à d'autres approches de couplage basées sur d'autres paradigmes et formalismes tout aussi intéressants que les agents.

3.5.2 Couplage par intégration des modèles

Dans cette section, nous présentons des démarches d'intégration formelles de modèles. Cette intégration formelle de modèles constitue une forme de couplage appelé couplage intégral des

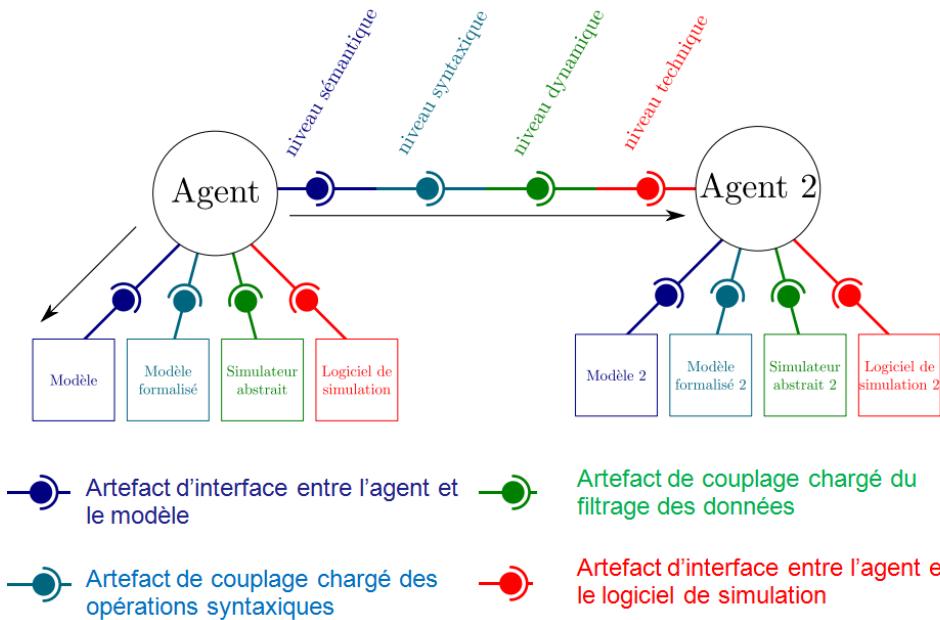


FIGURE 3.4 – Architecture du métamodèle AA4M (source : [Sie11])

modèles [Bel96]. Elle se fait soit par la réécriture complète des modèles soit par la modification partielle qui sert à adapter les modèles les uns aux autres. Nous présentons quelques exemples de couplage intégral pris dans la littérature.

Le modèle Belouze

Pour illustrer cette démarche d'intégration des modèles, le travail réalisé par [Bel96] introduit un cadre de modélisation pour la simulation de dynamiques spatiales complexes. Cette approche de couplage intégral sera appliquée sur le cas d'étude de la ville de Chishtian pour améliorer la performance de l'agriculture irriguée au Pakistan et prendre en compte les différents phénomènes qui entrent en jeu dans l'évolution d'un système irrigué. Il s'agit de simplifier et de modifier les modèles afin de les adapter les uns aux autres et à l'échelle du cas d'étude (ville Chishtian) pour construire le modèle intégré [Bel96]. Bien que cette méthodologie présente l'avantage d'avoir permis l'exploitation des connaissances d'autres disciplines, elle reste faiblement réutilisable sans modification préalable surtout s'il s'agit d'intégrer d'autres connaissances non prises en compte au départ par le modèle d'irrigation de la ville de Chishtian.

Le modèle "Maillé"

Dans un deuxième exemple le modèle de [ME05], offre un cadre de modélisation pour l'intégration des modèles selon deux axes : l'axe thématique et l'axe scalaire. Sur le plan thématique l'intégration consiste à formaliser des données pour faciliter leur transfert d'un modèle à un autre [Dub04]. La composante scalaire de cette démarche d'intégration a pour rôle de prendre en considération la dimension spatiale et temporelle du modèle. Ceci permet de respecter la granularité des modèles et d'assurer la synchronisation des différents modèles dynamiques [Dub04]. Cette méthodologie a été testée pour étudier la dynamique du risque lié à l'incendie de forêt (écologique, géographique, etc).

Nous nous intéressons dans ce qui suit à des formes plus complètes de couplage qui vont jusqu'à concevoir des formalismes de couplage dont nous présentons quelques uns développés dans le cadre de projets dédiés à la standardisation des démarches et des techniques de couplage.

3.5.3 Formalismes de couplage

Le couplage est souvent associé à la notion de facteur de couplage qui constitue un élément commun entre les modèles. Cet élément peut être une base de données, un espace ou un évènement temporel.

Le formalisme DEVS

Le formalisme abstrait et universel DEVS vise à assurer un couplage entre des modèles basé sur des événements discrets. Dans cette approche modulaire et hiérarchique [ZKP00] chaque modèle dispose d'un ensemble d'états et de fonctions de transition d'états. Pour pouvoir être couplé, un modèle DEVS atomique doit être encapsulé dans le formalisme DEVS [DRG02]. L'encapsulation consiste à mettre le modèle dans une boîte qui possède des ports d'entrée et de sortie, une dynamique interne et des ports d'observation (Fig. 3.5). Dans le prolongement de ces travaux, une interface graphique de modélisation dédiée au formalisme DEVS a été construite sous le nom de VLE.

X	<i>l'ensemble de ports d'entrée et les valeurs associées,</i>
Y	<i>l'ensemble de ports de sorties et de valeurs associée,</i>
S	<i>l'ensemble des états internes,</i>
δ_{ext}	<i>la fonction de transition externe décrivant l'évolution de l'état interne du modèle,</i>
δ_{int}	<i>la fonction de transition interne décrivant l'évolution naturelle de l'état interne du modèle,</i>
δ_{con}	<i>la fonction de résolution de conflits, spécifiant le comportement à tenir en cas de conflit,</i>
λ	<i>la fonction de sortie, mettant à jour les valeurs des ports de sortie,</i>
ta	<i>la fonction d'avancement du temps, utilisé afin de planifier la date de la prochaine transition interne.</i>

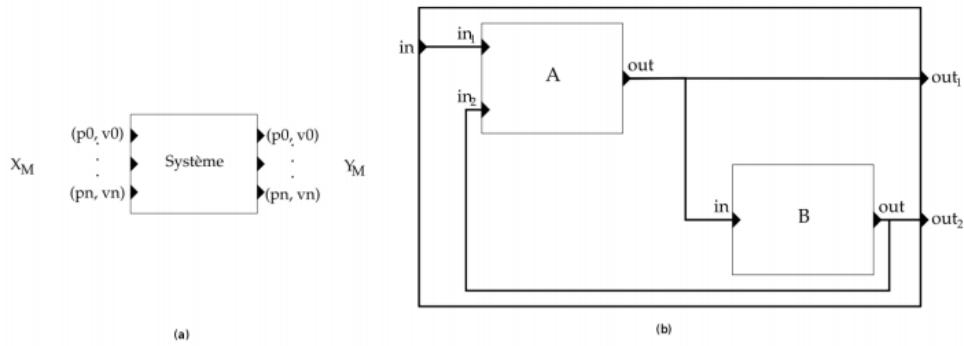


FIGURE 3.5 – Représentation graphique d'un modèle atomique (a) et d'un modèle couplé (b) en DEVS [AGJ⁺09]

Les ports d'entrée permettront de recevoir les événements externes, tandis que l'ensemble des ports de sortie émettront les événements vers les autres modèles à coupler [DRG02]. Ainsi les événements discrets sont utilisés pour coupler les modèles à travers les ports d'entrée et de sortie des modèles grâce aux fonctions de transition externes. Ainsi le formalisme DEVS présente l'avantage de garantir la cohérence temporelle du modèle global en synchronisant des

modèles hétérogènes [QDR05] encapsulés dans un formalisme extrêmement codifié qui leur permet de parler le même langage. De plus, de nombreux travaux montrent que DEVS peut encapsuler différents paradigmes tels que les équations différentielles [GBG00] ou les réseaux de Petri [GBG00] ou même des modèles agents [DGG02]. Ces propriétés du formalisme DEVS permettent également d'exprimer des concepts forts dans le couplage comme la hiérarchisation et la modularité [DGG02]. En effet, ce formalisme a été utilisé dans un contexte de simulation multi-échelles [DGG02] pour l'intégration des modèles d'agents réactifs situés et des équations différentielles. Cette intégration se fait grâce à un cadre rigide de modélisation qui nécessite un "mapping" au préalable pour assurer la spécification d'un modèle d'agents réactifs en DEVS [DGG02].

Le projet HLA

Le projet HLA (High Level Architecture) [GS00], [CW96], [DFF⁺98] a été lancé dans le cadre de travaux militaires du Département de la Défense américain (DoD) sur des simulations distribuées et la standardisation de leur interopérabilité. Il existe plusieurs plateformes de couplage de simulateurs dites de type HLA. En effet, HLA est avant tout un standard sur lequel se base plusieurs implantations possibles selon les besoins des modélisateurs. Cette approche a pour avantage de gérer l'ensemble des problèmes liés à l'interopérabilité des simulations distribuées. L'architecture logicielle proposée par ce standard HLA est formée par des fédérés qui représentent les simulateurs pour créer une fédération de simulateurs (Fig. 3.6). L'ensemble des simulateurs est contrôlé par une entité appelée RTI (Run Time Infrastructure) qui est en charge de la gestion de la fédération via un interfaçage spécifique.

Tout échange entre les simulateurs doit se faire au travers de la RTI [GS00]. Ainsi, les interactions entre les membres de la fédération ne peuvent se faire que par l'intermédiaire de l'interface qui est implantée en tant qu'un ensemble de services appartenant à l'interface (RTI) [GS00]. Ce standard est régi par un ensemble de règles (10 au total), appelées HLA rules décrivant les responsabilités des fédérés et des fédérations par un ensemble de principes techniques permettant la mise en œuvre de l'architecture HLA [GS00]. L'avantage des solutions respectant le standard HLA est de proposer un ensemble de solutions opérationnelles pour les problèmes liés à l'interopérabilité des simulations distribuées, la réutilisation des simulations, etc. Pour Banks [Ban01], malgré ses objectifs louables, l'architecture HLA reste ambiguë sur certains concepts peu explicites, elle doit être donc grandement simplifiée et révisée pour faciliter son implantation dans des modèles de façon plus transparente.

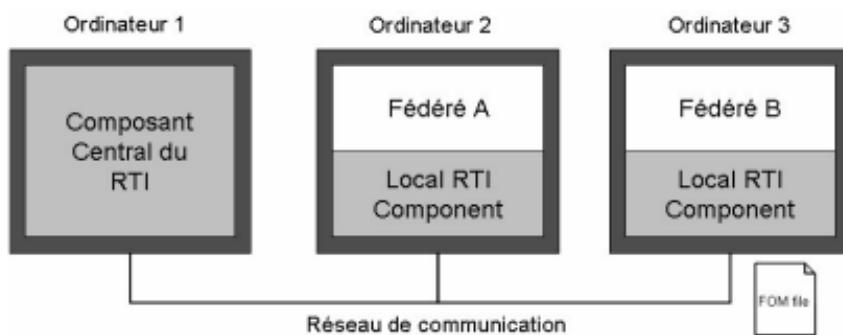


FIGURE 3.6 – Composants du RTI [Zac06]

Le standard FMI

Dans cette catégorie d'interface de couplage, on trouve également le standard FMI (Functional Mock-Up Interface) [ABC⁺11] qui fournit une interface de couplage standard pour coupler des modèles physiques (implémentés sur des simulateurs). Ce standard traite les problématiques liées à l'import et l'export de composants des modèles venant de différents domaines dans un outil de simulation industriel appelé (FMI pour les échanges des modèles). Avec ce standard il est possible également de créer des interfaces de co-simulation pour simuler les dynamiques non linéaires d'un système. Le composant qui permet d'implémenter le FMI s'appelle FMU (Functional Mock-up Unit) [ABC⁺11]. Il consiste en un ensemble de fonctions écrites en langage C ou de fichiers DLL accompagnés de fichiers de description de type XML. Cette technologie FMI a montré ses performances dans beaucoup de domaines de simulation [ABE⁺12] dans la mesure où elle permet de regrouper des simulateurs qui peuvent fonctionner de façon indépendante dans leurs environnements d'origine. D'autre part, grâce à ce standard les différents sous-systèmes couplés physiquement qui constituent la co-simulation peuvent communiquer ensemble même s'ils sont développés avec des technologies différentes [ABE⁺12].

En plus de ces formalismes de couplage, il existe une autre catégorie d'outils de couplage qui descendent au niveau technique et dynamique pour coupler des modèles implémentés sur des simulateurs. Nous présentons dans la section suivante certaines de ces plateformes.

3.5.4 Plateformes de couplage

Il s'agit dans cette section de faire le tour des approches qui cherchent à faire interagir des modèles en couplant leurs simulateurs.

La plateforme CosiMate

CosiMate [GDB08] est une plateforme de couplage qui permet de faire interagir des simulateurs hétérogènes à différents niveaux d'abstraction représentant des modèles mathématiques et physiques. A la différence des solutions point à point où un simulateur n'est capable de communiquer qu'avec un seul autre simulateur, CosiMate [GDB08] offre une architecture basée sur le principe de la co-simulation (Fig. 3.7). Cette solution a pour avantage d'offrir aux modélisateurs une architecture ouverte de couplage avec plusieurs points d'intégration et de communication de simulateurs hétérogènes tout en optimisant l'utilisation des ressources matérielles (CPU, mémoire, etc). Il est ainsi possible de coupler un nombre illimité de simulateurs.

Une fois que la co-simulation est lancée, les utilisateurs peuvent agir sur leurs simulateurs d'origine de façon transparente. Ces simulateurs sont intégrés de façon très flexible même s'ils sont à des niveaux d'abstraction ou développés dans des environnements différents. L'interconnexion et la distribution des simulateurs est adaptée au travail de modélisation multidisciplinaires des différentes équipes souvent appelées à intervenir sur un même projet. Un contrôleur de données assure la synchronisation entre les différents environnements lors de la co-simulation qu'il est possible de suivre à travers des rapports internes de surveillance. La plateforme Cosimmate [GDB08] offre donc une solution qui couvre bien les problèmes liés à la simulation de systèmes dynamiques et à larges échelles.

La plateforme IMAGIN

IMAGIN est une plateforme d'intégration de modèles à base d'agents proposée par le laboratoire LSIS [SET06]. Elle est fondée sur la combinaison du standard de la FIPA [ON98]

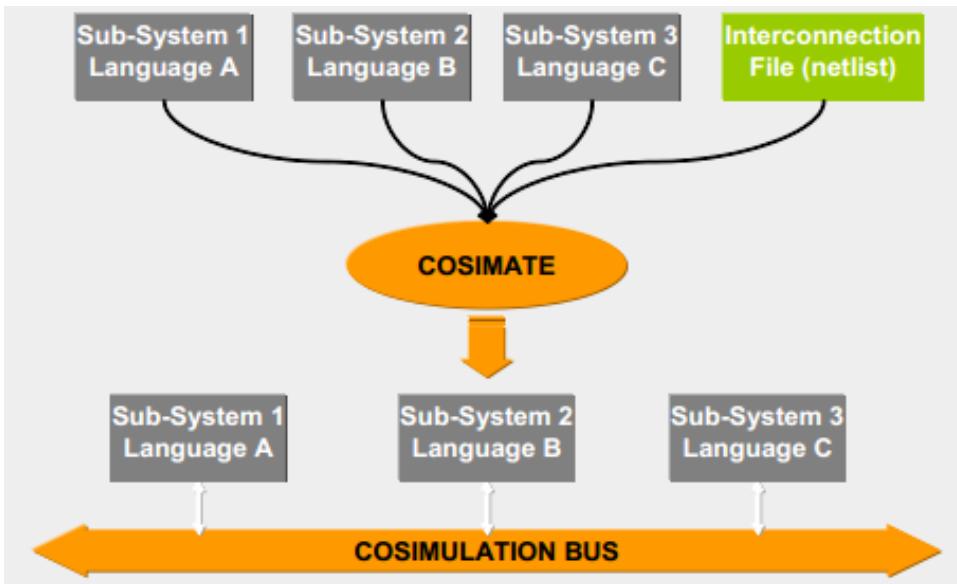


FIGURE 3.7 – L'architecture de COSIMATE [GDB08]

avec le standard HLA [GS00] pour la gestion de l'interopérabilité des modèles qui se fait par invocation de service et par échange de données. Cette plateforme est conçue comme un système multi-agents regroupant un ensemble d'agents génériques, tels que les agents interfaces HLA, les agents de synchronisation ou de gestion des conflits, et des agents spécifiques, tels que les agents adaptateurs, qui encapsulent les modèles. Ainsi les interactions entre les modèles deviennent de simples échanges entre agents (le plus souvent des échanges de messages) ce qui simplifie considérablement le processus de couplage.

Cette approche de couplage appelée aussi multi-modélisation ou fédération de simulateurs consiste à faire interagir les modèles en couplant leurs simulateurs. Les modèles intégrés dans la plateforme IMAGIN ne sont pas encapsulés dans un formalisme plus générique mais gardent leurs formalismes respectifs et interagissent ensemble via le couplage de leurs simulateurs. Cette technique est largement utilisée dans des domaines comme l'automobile, l'armée et l'électronique [LR08]. La combinaison des standards HLA et FIPA avec le paradigme agent offre aux modélisteurs sur cette plateforme la possibilité de construire un multi-modèle par la réutilisation des outils de modélisation et le couplage de leurs simulateurs.

Nous proposons dans la figure (Fig. 3.8) une vue d'ensemble de ces modèles, formalismes et plateformes de couplage. L'intérêt de cette classification est de voir la tendance en matière de couplage pour pouvoir se positionner en profitant des avantages des méthodes existantes qui entrent bien dans le cadre de notre problématique de modélisation des systèmes complexes spatiaux. Nous remarquons d'après cette figure que la majeure partie des démarches de couplage élaborées tendent vers le couplage à base d'agents. Les formalismes et les plateformes ne sont pas encore assez développés. Ceci est justifié par le succès qu'ont eu les modèles agents dans le domaine du couplage, à cause de la capacité de ces agents à assurer les échanges et à jouer le rôle d'intermédiaires entre modèles.

Dans cette section, nous avons fait le tour des méthodes, modèles et outils de couplage afin d'étudier les spécificités et le degré de généricité de chaque modèle. Certaines méthodes se limitent au niveau technique qui assure l'interopérabilité et l'intégration des simulateurs, tant dis

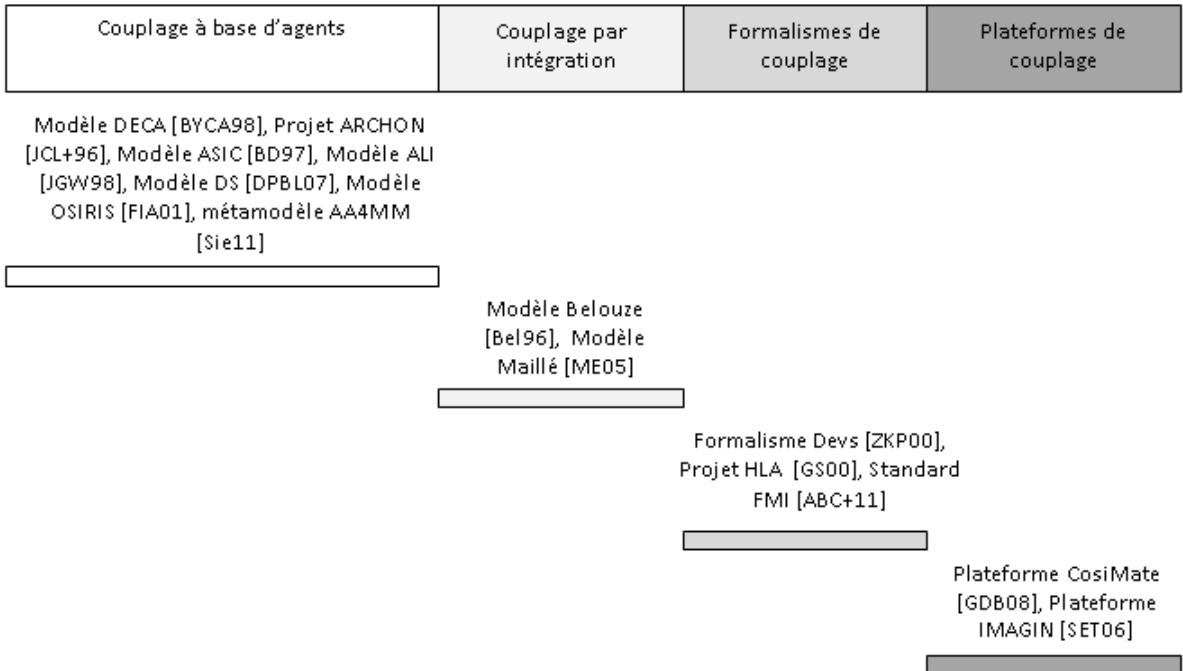


FIGURE 3.8 – Comparatif des modèles, des formalismes et des plateformes de couplage

que d'autres plateformes et méthodes de couplage montent jusqu'au niveau conceptuel offrant ainsi un couplage plus robuste et plus adapté aux besoins particuliers des modélisateurs.

L'avantage de ces plateformes est de permettre la réutilisation des simulateurs. Certaines d'entre elles utilisent des standards et des méthodologies unanimement reconnus (comme la plateforme HLA) ce qui confère à ces solutions une forte crédibilité scientifique. Cependant la majorité de ces plateformes restent limitées sur le plan conceptuel, les notions de niveaux d'abstraction ne sont pas explicitement abordées. Nous considérons par ailleurs qu'aucune de ces méthodes ne répond à toutes les contraintes relatives au processus de couplage à la fois dont nous citons principalement : la différence des échelles spatiales et temporelles, l'hétérogénéité des formalismes des modèles à coupler (modèles mathématiques, modèles stochastiques, modèles informatiques, modèles orientés agents, modèles individus centrés, etc) tout en utilisant l'espace comme facteur de couplage.

3.6 Positionnement et critiques

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur la problématique du couplage en définissant ses niveaux (conceptuel, sémantique, syntaxique, dynamique, technique) et ses contraintes (réutilisation, interopérabilité, modularité, hétérogénéité et la différence des échelles spatiales et temporelles des modèles). Nous avons détaillé davantage la dernière contrainte relative au contexte spatio-temporel du couplage qui nous a semblé la plus importante dans un tel processus étant donné la diversité des modèles trouvés dans la littérature et la nécessité de représenter des dynamiques souvent à différentes échelles temporelles et spatiales.

Nous avons également présenté des méthodes de couplage proposées dans la littérature. Ces

approches permettent de répondre à certaines difficultés de couplage comme la modularité, l'hétérogénéité, le changement des échelles. Cependant en passant en revue l'ensemble de ces approches nous avons noté qu'elles sont souvent très liées aux thématiques ou aux problèmes que ces études ont à résoudre. En effet, bien que les modèles présentés ont fait leurs preuves dans le passé, ils restent difficiles à réutiliser dans un autre contexte. Le manque de généréricité de certains de ces modèles affaiblit la pertinence du couplage et empêche leur réutilisation dans d'autres contextes. Il existe très peu de travaux dans ce domaine qui permettraient d'avoir une approche générique pour la conception et la gestion du processus du couplage dans le domaine de la modélisation spatiale.

Nous considérons donc que le principal inconvénient des approches existantes provient du fait qu'elles ne ciblent pas l'interopérabilité de modèles déjà existants et l'utilisation de l'espace comme facteur de couplage. Nous reprenons dans le chapitre suivant l'ensemble des problématiques abordées dans cet état de l'art en explicitant notre positionnement par rapport aux méthodes et outils de couplage existants ainsi que les principaux verrous scientifiques que nous proposons de soulever dans le cadre de cette thèse.

Partie II : L'approche de couplage Coupling4modeling

Chapitre 4

Élever l'espace comme facteur de couplage

Sommaire

4.1	Introduction	75
4.2	Synthèse de l'état de l'art	76
4.3	Critiques et positionnement	77
4.3.1	Classification des approches de couplage	77
4.3.2	Positionnement par rapport aux solutions de couplage existantes	82
4.3.3	Limites des approches de couplage existantes	83
4.4	La modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage des modèles	84
4.4.1	Enjeux du couplage dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux	84
4.4.2	Utiliser l'espace comme facteur de couplage	86
4.4.3	Un système multi-agents pour faire interagir les modèles	87
4.4.4	Un outil méthodologique et conceptuel pour une intervention pluridisciplinaire sur l'espace	89
4.5	Un exemple fil rouge	91
4.5.1	Les modèles à coupler	91
4.5.2	Justification du choix des modèles	93
4.6	Synthèse et discussion	93

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue les différentes solutions existantes concernant le couplage et la réutilisation des modèles. Nous entamons dans ce chapitre une synthèse de l'état de l'art afin de récapituler les concepts et les paradigmes utilisés pour aborder les problématiques liées à la modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage de modèles existants. Nous nous focaliserons en particulier sur deux travaux à savoir le modèle DS [DPBL07] et le métamodèle AA4M [Sie11] qui présentent des concepts intéressants en termes de couplage de modèles. Un logiciel de sériation des données [Bel14] par scalogramme

de Guttman [Gut44] sera utilisé pour classer les différentes solutions de couplage identifiées. Nous cherchons à travers cette synthèse à nous positionner par rapport aux modèles et outils de couplage existants afin d'identifier les limites de ces solutions et de situer davantage notre approche dans le domaine de la modélisation des systèmes complexes spatiaux.

Ce chapitre a pour but dans un second temps de montrer les questions auxquelles nous allons nous confronter pour assurer le couplage des modèles et de faire pressentir la façon avec laquelle nous comptons y répondre. Nous finirons le chapitre par la présentation d'un exemple fil rouge qui nous permettra d'illustrer les concepts de notre approche présentée tout au long de la partie réservée à la contribution de la thèse.

4.2 Synthèse de l'état de l'art

On parle désormais de toute une science des systèmes complexes qui a commencé à se développer depuis les années 50 sous l'impulsion des scientifiques qui travaillent sur des applications dans un grand nombre de domaines : mathématiques, biologie, physique, sociologie, etc. Cette révolution scientifique a fait apparaître un nouveau paradigme : celui de la complexité [Piv97].

Généralement, on peut parler de complexité quand la reproduction des différentes fonctions d'un système, nécessite la présence d'un nombre important d'éléments indépendants en interaction. Ces systèmes sont caractérisés par des propriétés comme l'auto-organisation, l'auto-reproduction, l'auto-apprentissage et l'auto-adaptation [Sch11]. Ceci rend la modélisation de ces systèmes complexes souvent difficile à faire dans un seul modèle. En particulier quand il s'agit de systèmes complexes spatiaux qui intègrent la composante de l'espace perçu à la fois comme l'acteur et le résultat du comportement du système. Ces systèmes complexes spatiaux sont caractérisés par une dimension temporelle, une dimension spatiale et une dimension décisionnelle où l'espace est modélisé pour répondre à des besoins particuliers en tenant compte d'un grand nombre de facteurs et d'acteurs.

Quand on parle de modélisation spatiale il s'agit souvent d'étudier un phénomène spatial régi par des lois spécifiques. Plusieurs travaux ont abordé ces problématiques liées à la modélisation spatiale en utilisant des techniques et des paradigmes différents allant des modèles mathématiques, aux automates cellulaires, aux systèmes multi-agents. Si chacune de ces techniques offre des avantages et des inconvénients, la combinaison de tous ces paradigmes à la fois pourrait offrir une modélisation certainement plus adéquate et plus complète des systèmes complexes spatiaux.

L'idée est d'utiliser le principe du couplage des modèles pour produire ce que les modélisateurs appellent un multimodèle. Ce dernier doit assurer l'interaction, la coordination et la corrélation entre les modèles pour avoir une vue globale sur le phénomène étudié. Le processus de couplage est en soi un véritable travail pluridisciplinaire. En effet, il s'agit de satisfaire à des contraintes allant du niveau purement conceptuel de prise en compte de plusieurs modèles hétérogènes jusqu'aux contraintes techniques d'interopérabilité des outils de simulation. Cela nécessite des connaissances aussi bien dans les domaines thématiques des modèles à coupler (dans notre cas les dynamiques urbaines), que dans le domaine de la théorie de la modélisation et de la simulation ainsi que dans le domaine de l'ingénierie logicielle.

Beaucoup de travaux ont permis de classer le couplage en plusieurs types (faible, fort, intégral) afin que le modélisateur puisse situer et développer son approche selon ses besoins [Fia01]. D'une manière générale, la modélisation des systèmes complexes implique automatiquement un couplage fort ou intégral étant donné que le couplage faible de modèles représente peu d'intérêt pour ce type de systèmes. Dans la partie précédente nous avons passé en revue les approches de

modélisation et de simulation qui ciblent la problématique du couplage pour l'étude de divers systèmes complexes qui ne sont pas forcément spatiaux.

Dans ce qui suit, nous allons classer ces approches dans le but de nous positionner et d'expliquer les principes de base de notre approche.

4.3 Critiques et positionnement

Dans le chapitre précédent, nous avons distingué cinq types de couplage à savoir : faible, fort, moyen, coopératif et intégral. Nous pensons que le degré du couplage ne montre pas la réelle différence entre les méthodes. Ainsi dans cette section nous allons procéder à la classification des méthodes et plateformes de couplage selon nos propres critères dans le but de nous positionner par rapport à l'existant.

4.3.1 Classification des approches de couplage

Nous proposons donc une classification basée sur quatre principes de couplage, décelés à partir des caractéristiques des approches existantes, à savoir : le couplage de simulateurs, le couplage à base de facteur commun entre les modèles, le couplage à base d'intermédiaires, le couplage intégral. La figure (Fig. 4.1) permet de schématiser ces quatre critères qui seront détaillés dans ce qui suit.

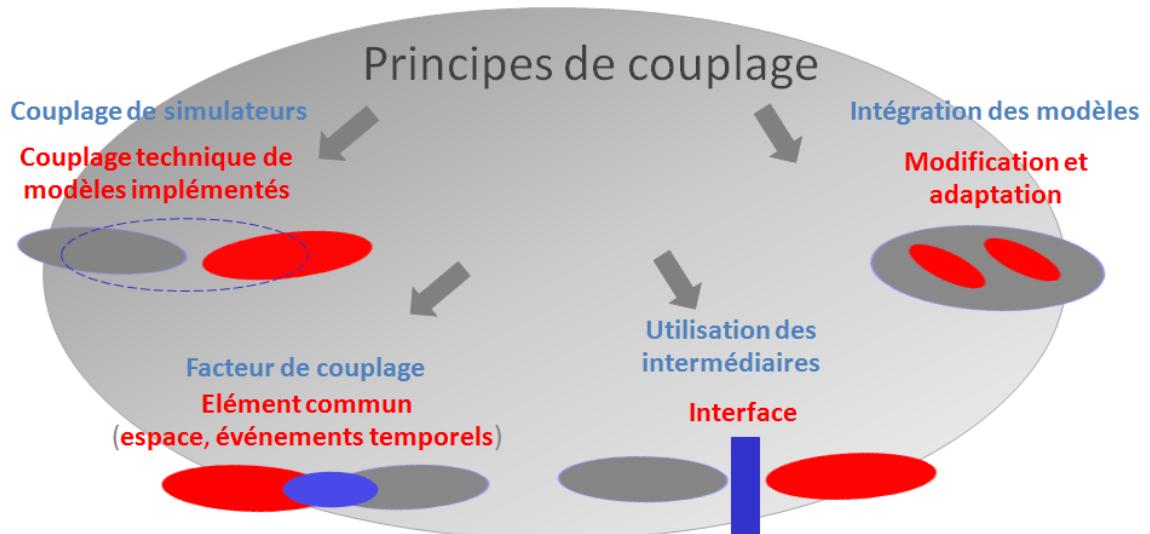


FIGURE 4.1 – Principes de couplage

Le premier critère (couplage de simulateurs) nous permet de distinguer les approches de couplage qui s'intéressent au couplage des modèles implémentés sur des plateformes de simulation (simulateurs). Comme nous allons nous limiter au couplage des modèles, ces approches pourraient nous inspirer lors de la résolution des problèmes relatifs au processus de couplage mais ne présentent pas beaucoup d'intérêt pour nous.

Le deuxième critère qui porte sur le facteur de couplage nous permet d'identifier les approches, les méthodes ou les modèles de couplage qui exploitent un élément commun pour corrélérer les modèles à coupler. Ce facteur de couplage peut être spatial ou temporel. En effet, si

l'espace peut être utilisé pour assurer les échanges des données, un événement temporel externe connu des deux modèles peut également être utilisé pour assurer la transition de l'état global du modèle à coupler d'un état à un autre. Comme nous nous intéressons à la modélisation des systèmes complexes spatiaux, les méthodes qui utilisent l'espace comme facteur de couplage présentent un intérêt particulier pour nous.

Le troisième critère, à savoir l'utilisation d'un intermédiaire, nous permet quant à lui de distinguer les approches qui se basent sur une interface de couplage pour assurer l'interopérabilité des modèles à coupler. Ces approches nous intéressent également dans la mesure où elles montrent le principe de fonctionnement de l'élément intermédiaire qui assure le couplage des modèles. Ces intermédiaires peuvent être de différents types à savoir des agents, des processus, des modules coordinateurs ou des tableaux noirs, etc. Comme nous estimons que l'approche agent est une des approches les plus adéquates aux spécificités des systèmes complexes spatiaux, nous allons particulièrement nous intéresser aux méthodes de couplage qui utilisent l'agent pour assurer la fonction d'interfaçage.

Le quatrième critère nous permet de distinguer les méthodes qui se basent sur le principe de l'intégration des modèles où les modèles sont modifiés et adaptés les uns aux autres pour former un nouveau modèle unique. Ce type d'approches nous montre quelles sont les modifications et les adaptations à apporter aux modèles pour pourvoir les intégrer et les interconnecter [Ram06].

Pour classer les approches existantes de couplage selon ces quatre critères, nous proposons d'utiliser l'outil BSK [Bel14]. Il s'agit d'un logiciel de sériation des données par scalogramme de Guttman [Gut44] et la théorie de l'information, développé par Abdelkader Ben Saci au laboratoire d'analyse des formes ENSA Lyon qui nous permettra de suggérer une nouvelle classification des méthodes basée sur nos propres critères. Notons qu'un scalogramme (ou Échelle de Guttman) est défini dans [Gut44] comme étant une "*Échelle de mesure pour laquelle les propositions sont classées de sorte que l'accord du répondant à l'une d'entre elles suppose son accord à toutes celles qui lui sont préalables*". Ainsi en se basant sur le scalogramme de Guttman, l'outil BSK [Bel14] nous permet d'avoir des classes de modèles selon leurs ressemblances dans les critères de classification.

Pour pouvoir utiliser cet outil de sériation, nous avons intégré le tableau (Tab. 4.1) qui regroupe les approches en lignes et les critères de classements en colonnes. A travers ce tableau de synthèse (Tab. 4.1) nous cherchons à mettre en évidence ce qui est différent et ce qui est commun entre toutes les méthodes de couplage recensées précédemment. L'outil BSK [Bel14] nous a permis d'avoir la classification suivante (Tab. 4.2).

Lors de la lecture de ce tableau on s'intéresse à la disposition des 0 et des 1 dans les cellules. On s'intéresse notamment aux cellules contenant le chiffre 1 qui exprime une correspondance entre le modèle en ligne et la propriété en colonne. D'après ce tableau (Tab. 4.2) on peut déduire les constats suivants :

- La grande majorité des méthodes et plateformes de couplage offrent un couplage de simulateurs et se basent sur un intermédiaire pour assurer le couplage. Très peu de méthodes utilisent les événements temporels ou l'espace comme facteur de couplage. Rares sont les méthodes qui optent pour un couplage intégral des modèles. Ceci nous permet de déduire que les propriétés 1 et 2 (couplage de simulateurs et utilisation d'un intermédiaire) sont dominantes. Les propriétés 3 et 4 (facteurs de couplage et intégration des modèles) le sont un peu moins ;
- Il existe cependant des méthodes de couplage de simulateurs qui n'utilisent pas un intermédiaire pour assurer l'interaction entre les simulateurs comme la plateforme Cosimate ;

Appr \ Crit	Coupl simul	Fact de coupl : esp/tps	Util d'un interm	Integ des mod
OSIRIS	0	0	1	0
BELOUZE	0	0	0	1
DEVS	0	1	0	0
URBANSIM	0	0	1	0
HLA	1	0	1	0
DS	0	1	1	0
AA4MM	1	0	1	0
DECA	0	0	1	0
ASIC	0	0	0	1
COSIMATE	1	0	0	0
ARCHON	1	0	1	0
ALI	1	0	1	0
IMAGIN	1	0	1	0

TABLE 4.1 – Liste des modèles, des formalismes et des plateformes de couplage/Principes de couplage.
 Légende : Appr : Approches de couplages ; Crit : Critères de classification ; Coupl simul : Couplage de simulateurs ; Fact de coupl esp/tps : Facteurs de couplage (espace / temps) ; Util interm : Utilisation d'un intermédiaire ; Integ des mod : Intégration des modèles

Appr \ Crit	Coupl simul	Util d'un interm	Fact de coupl : esp/tps	Integ des mod
COSIMATE	1	0	0	0
HLA	1	1	0	0
IMAGIN	1	1	0	0
AA4MM	1	1	0	0
ARCHON	1	1	0	0
ALI	1	1	0	0
OSIRIS	0	1	0	0
URBANSIM	0	1	0	0
DECA	0	1	0	0
DS	0	1	1	0
DEVS	0	0	1	0
BELOUZE	0	0	0	1
ASIC	0	0	0	1

TABLE 4.2 – Liste des modèles, des formalismes et des plateformes de couplage classés par principes de couplage. Légende : Appr : Approches de couplages ; Crit : Critères de classification ; Coupl simul : Couplage de simulateurs ; Fact de coupl esp/tps : Facteurs de couplage (espace / temps) ; Util interm : Utilisation d'un intermédiaire ; Integ des mod : Intégration des modèles

- Il est possible d'avoir des méthodes de couplage basées uniquement sur l'utilisation d'un intermédiaire de couplage (tels que les modèles : UrbanSIM, Deca). Ce qui nous permet de distinguer une nouvelle catégorie de méthodes basées sur l'utilisation d'un intermédiaire pour le couplage des modèles ;
- Seul le modèle DS regroupe l'utilisation d'un intermédiaire avec l'utilisation d'un facteur de couplage ce qui constitue une transition vers une nouvelle catégorie d'approches de couplage basée sur l'identification d'un facteur de couplage qui peut être le temps ou l'espace ;
- Il existe des méthodes basées uniquement sur l'intégration et l'adaptation des modèles à coupler pour faire partie d'un super modèle. Ce qui nous permet d'identifier une nouvelle catégorie de modèles basée sur le couplage intégral.

Ce tableau (Tab. 4.2) sera interprété graphiquement par le même outil de sériation des données BSK, pour générer le scalogramme de la figure (Fig. 4.2) qui montre une classification automatique des approches et méthodes de couplage recensés lors de notre étude de l'existant. On

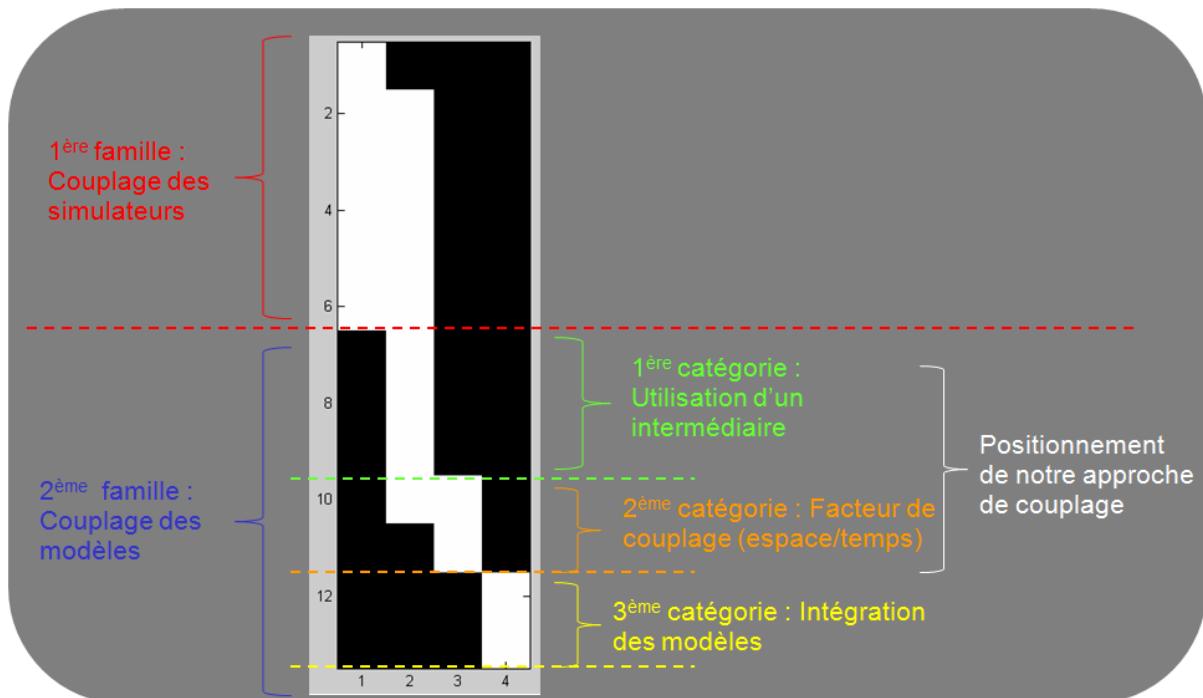


FIGURE 4.2 – Scalogramme de classification des approches de couplage généré par l'outil BSK

trouve donc sur l'axe des abscisses, les quatre critères (énumérés de 1 à 4) qui correspondent aux colonnes du tableau (Tab. 4.2). L'axe des ordonnées permet de classer les 13 modèles de couplages recensés (énumérés de 1 à 13) et qui vont correspondre aux lignes du tableau (Tab. 4.2). Pour analyser ce scalogramme (Fig. 4.2) on va s'intéresser aux cases blanches, qui représentent une correspondance entre une méthode de couplage et un critère. La rupture de l'espace blanc indique un changement de classes ou de sous-classes selon l'estimation subjective de l'observateur. En partant de ce principe, on peut distinguer sur le scalogramme deux familles de modèles dont la deuxième sera porteuse d'autres sous classes avec des caractéristiques différentes.

En effet, on distingue sur la figure (Fig. 4.2) une première rupture dans l'ensemble des cellules blanches qui nous permet de distinguer une première famille de méthodes basée sur le couplage

de simulateurs et une deuxième famille basée sur le couplage des modèles. Dans cette deuxième famille on peut observer une deuxième rupture des cellules blanches qui permet de distinguer un nouvel ensemble de méthodes basées sur l'utilisation d'un élément intermédiaire pour assurer le couplage. De même une troisième rupture de l'espace blanc nous permet de former un autre groupe de méthodes basées sur l'utilisation d'un facteur de couplage. Finalement, une quatrième classe de méthodes sera identifiée, suite à une nouvelle rupture de l'espace blanc, qui sera basée sur le principe de l'intégration des modèles.

Nous retenons donc deux grandes familles de couplage : les méthodes de couplage de simulateurs et les méthodes de couplage des modèles. La deuxième famille sera elle-même divisée en sous catégories grâce à une classification de méthodes basée sur le principe de couplage. La classification générée par l'outil BSK nous permet de déceler les approches et les méthodes de couplage qui se ressemblent et qui pourraient le plus nous inspirer lors de l'élaboration de notre approche de couplage. Ceci a pour but de nous permettre de choisir le principe de couplage adéquat à notre problématique de couplage des systèmes complexes spatiaux.

4.3.2 Positionnement par rapport aux solutions de couplage existantes

Comme indiqué précédemment, nous nous positionnons dans la catégorie des approches de couplage génériques dans le domaine de la modélisation spatiale. Étant donné que nous optons pour un couplage de modèles qui exploite l'espace et les agents pour assurer l'interaction des modèles, nous nous positionnons plus particulièrement entre la catégorie de modèles qui utilisent un facteur de couplage et la catégorie de modèles qui se basent sur un système intermédiaire dans la figure (Fig. 4.2). Ceci nous permet d'exploiter l'espace (une partie d'intégrante du système) comme espace de stockage des données modifiées par les modèles et le système multi-agents de couplage pour lire et écrire les données des modèles à coupler à partir de cet espace dans le but de répondre aux spécificités des systèmes complexes spatiaux.

Plus particulièrement, nous distinguons donc le modèle DS [DPBL07] qui utilise l'espace comme facteur de couplage et le métamodèle AA4M [Sie11] qui spécifie la mise en place d'un système multi-agents pour assurer les échanges entre les modèles. Nous reprenons dans ce qui suit les principales caractéristiques de ces deux modèles.

Le modèle DS [DPBL07]

Nous avons choisi ce modèle étant donné qu'il utilise l'espace et les agents lors de l'opération de couplage. Comme nous nous positionnons entre ces deux catégories de méthodes, ce modèle nous paraît intéressant à étudier de plus près. Dans ce modèle (cf. section 3.5 page 62), la gestion de la différence des échelles spatiales se fait grâce au découpage du territoire réunionnais, en 4 microrégions qui seront découpées en parcelles de terre tout en appliquant sur l'île le masque d'une grille cellulaire. Ainsi ce découpage permet de coupler la dynamique de la population qui évolue à l'échelle micro avec la dynamique d'évolution du mode d'occupation des sols qui se développe à l'échelle macro. On note cependant une absence totale de la gestion des échelles temporelles des deux dynamiques étant donné que les deux dynamiques évoluent au même pas de temps.

Le modèle DS peut ainsi fonctionner avec des cartes et des données relatives à une région autre que l'île de La Réunion ce qui lui confère un caractère générique dans le domaine de la modélisation urbaine. Cependant, le couplage est effectué entre dynamiques et non entre modèles ce qui limite la réutilisation de cette technique de couplage pour coupler d'autres modèles et la

rend étroitement liée à la problématique d'aménagement du territoire. On pourrait donc partir du principe de couplage basé sur l'espace et le paradigme agent pour le généraliser davantage au domaine de la modélisation spatiale.

Notons également que ce modèle n'entre pas en profondeur dans la problématique de couplage dans la mesure où il ne spécifie pas comment traiter les contraintes de couplage comme la modularité, la réutilisation, l'hétérogénéité et la gestion de la différence des échelles temporelles des modèles. Il semble que ces aspects doivent être implicitement gérés par le modélisateur.

Le métamodèle AA4M [Sie11]

Il s'agit, comme présenté précédemment (cf. section 3.5), d'un métamodèle de multimodélisation orienté agent et basé sur les artefacts qui permet de coupler des modèles et des simulateurs existants. L'originalité de ce métamodèle se situe dans l'utilisation des artefacts qui constituent des entités passives utilisables par les agents. En effet, ces artefacts jouent le rôle d'intermédiaire entre les agents et les simulateurs lors de l'opération du couplage. Plus particulièrement, les artefacts d'interface et les artefacts de couplage permettent de prendre en considération les contraintes de couplage en traitant les questions posées par niveaux (sémantique, syntaxique, dynamique, etc).

Même si le métamodèle peut constituer une bonne base de départ pour la structuration de notre approche de couplage, il reste limité par l'absence totale de l'espace dans la modélisation proposée. En effet, comme nous nous intéressons aux systèmes complexes spatiaux il nous semble important d'intégrer la composante de l'espace dans le processus du couplage afin de pouvoir observer le résultat de la corrélation entre les modèles de façon concrète et sur un support physique qui permet le stockage des données. Nous reprenons ces inconvénients ainsi que ceux des autres méthodes pour en faire une synthèse dans la section suivante.

4.3.3 Limites des approches de couplage existantes

Les méthodes de couplage trouvées dans la littérature assurent généralement une bonne interaction entre les modèles quand elles sont appliquées à leur cas d'étude sauf que l'espace est rarement utilisé comme facteur de couplage des modèles représentant le système. Notons par ailleurs que les approches multi-agents apportent des solutions pour la satisfaction des contraintes relatives au processus de couplage à des degrés différents. Ceci revient au fait qu'un modèle multi-agents est en soi un système complexe composé d'éléments en interaction [Sie11]. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limites cependant aucune de ces solutions n'est entièrement satisfaisante.

En effet, comme il s'agit de coupler des modèles venant de domaines différents avec des formalismes différents, les contraintes les plus importantes lors du couplage sont l'hétérogénéité des formalismes et la différence des échelles des modèles. Si certaines méthodes et plateformes de couplage gèrent l'aspect multi-échelles, rares sont celles qui montrent explicitement comment l'hétérogénéité des formalismes des modèles est prise en compte. Par exemple, il n'est pas évident de comprendre ce qui se passe quand une dynamique est modélisée par un modèle à équations différentielles et une autre par un modèle multi-agents. En effet, certaines démarches ne montrent pas comment rendre un modèle, pas forcément conçu pour interagir avec d'autres modèles, facile à utiliser dans une plateforme de couplage de manière autonome ou couplée. Tous ces aspects doivent être implicitement gérés par le modélisateur lors de l'intégration des modèles dans la plateforme. D'autres travaux se focalisent sur un cas d'étude particulier pour créer un multi-modèle qui permet d'étudier les phénomènes d'inter-influences. Ceci donne à certains de

ces travaux une spécificité plus expérimentale et beaucoup plus spécifique à un cas d'étude particulier.

Pour conclure, nous dirons que ces solutions prises une à une ne couvrent pas tous les aspects de l'objectif scientifique que nous cherchons à atteindre. En effet, une des problématiques majeures des démarches de couplage à caractère spatial est de trouver un moyen de faire interagir les modèles en utilisant l'espace et en respectant un certain nombre de contraintes à savoir principalement la gestion de l'hétérogénéité des formalismes, des échelles spatiales et des échelles temporelles des modèles. Toutes ces méthodes utilisent le couplage des modèles pour comprendre certains phénomènes complexes. Toutefois, on note que certaines de ces méthodes manquent de généréricité et sont étroitement liées à leur domaine d'application. Elles deviennent donc difficiles à réutiliser dans d'autres champs d'application.

La principale limite des solutions que nous venons de passer en revue provient du fait qu'elles ne prennent pas en compte les spécificités et les contraintes liées aux systèmes complexes spatiaux (à savoir la dimension spatiale et temporelle qui caractérisent ces systèmes). Comme nous avons besoin d'une approche de couplage qui soit adaptée aux spécificités des systèmes complexes spatiaux, celle-ci se doit d'apporter à la fois les avantages d'une approche multi-agents et d'une approche qui intègre la composante de l'environnement comme un espace de stockage des données modifiées par les modèles.

4.4 La modélisation des systèmes complexes spatiaux par le couplage des modèles

Les démarches de couplage et de réutilisation de modèles posent des contraintes relativement bien identifiées. De manière synthétique, l'approche de couplage à proposer aura pour rôle de garantir le respect de l'ordre d'exécution des modèles selon leurs échelles temporelles, de permettre la flexibilité de la simulation (ajout, suppression ou échange d'un modèle de manière rapide) [Bon08] et de gérer la différence des échelles spatiales entre les modèles et l'espace dans lequel les données sont stockées.

Notre contribution consiste à proposer une approche de modélisation des systèmes complexes à caractère spatial basée sur le couplage des modèles multi-échelles fondés sur des formalismes hétérogènes. Pour cela, un système multi-agents sera utilisé pour gérer l'interopérabilité, l'hétérogénéité et les échelles des modèles.

Dans ce qui suit nous allons détailler davantage les différents verrous scientifiques à résoudre dans le domaine de la modélisation spatiale complexe. Nous finirons par expliciter les aspects conceptuels de notre contribution qui permettent de répondre à cette problématique.

4.4.1 Enjeux du couplage dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux

Dans de nombreux travaux d'ingénierie, la modélisation des systèmes complexes spatiaux (tels que les systèmes urbains, les systèmes géologiques, les systèmes épidémiologiques, etc) nécessite l'intégration de composants (logiciels et matériels) qui posent de plus en plus de défis et de difficultés à résoudre (cf. section 2.6 page 44). C'est dans ce contexte que se situe notre contribution dans la mesure où ces systèmes sont généralement modélisés par des spécialistes de différents domaines (comme les géographes, les mathématiciens, les statisticiens, etc) qui ne sont pas forcément experts en couplage de modèles. Notons que l'objectif principal de cette approche est la prise en compte des différents aspects du système par des modèles séparés. La finalité

n'étant pas de modifier directement le fonctionnement des modèles à coupler mais plutôt de représenter l'évolution du système durant la simulation.

Capitalisation de modèles validés dans des études antérieures

Notre principale motivation scientifique est notamment d'aborder différemment la modélisation des systèmes complexes spatiaux en permettant à des personnes appartenant à des disciplines différentes de coopérer ensemble. Ainsi l'enjeu de ce travail se situe dans la réutilisation, in extenso, de modèles capitalisés dans la littérature, validés dans le cadre de recherches antérieures, pour une production, plus facile, de nouveaux modèles et simulateurs répondant à une question scientifique. Cette démarche prolonge les approches actuelles qui se résument, le plus souvent, par le développement *"from scratch"* de modèles et simulateurs par inspiration et non par réutilisation de l'existant.

En effet, il existe pléthore de modèles dans toutes les sciences et les domaines de recherche conçus et validés dans des études passées et qui sont rarement réutilisés dans de nouvelles études. Lorsque des modèles ont prouvé leur efficacité dans un domaine particulier, il est utile et important de pouvoir les réutiliser. L'intérêt principal de cette démarche, pour les modélisateurs, est de pouvoir choisir le type de modèle le plus apte à rendre compte des dynamiques identifiées en fonction des données disponibles et de valider de manière incrémentale des modèles relativement simples pour construire des modèles plus grands avec une plus grande complexité.

Nous pensons que la capitalisation de modèles existants permet non seulement de gagner le temps de modélisation et du test mais également de profiter des expériences passées et du travail des experts dans la thématique abordée.

Couplage de modèles hétérogènes multi-échelles

Le concept du couplage est appréhendé comme un moyen de mettre en commun différentes représentations et références dans un même modèle pour représenter le système complexe spatial étudié [Lin06]. Ainsi coupler des modèles existants revient principalement à définir les façons de gérer l'hétérogénéité des formalismes utilisés et les différences des échelles dans les modèles concernés par le couplage. Nous avons noté que les relations entre les différents modèles qu'on aura à coupler peuvent engendrer dans certains cas des changements d'échelles. Ainsi la description multi-échelles de notre système spatial complexe nécessitera la mise en œuvre d'interactions microscopiques et macroscopiques qui sont généralement la base de la dynamique des organisations émergentes.

Par ces fonctions, nous devons être en mesure de comprendre les propriétés d'évolution et d'adaptation des systèmes étudiés. Ces évolutions conduisent généralement à des structures hiérarchiques, comme dans les systèmes urbains, où les simulations peuvent avoir besoin de descriptions allant du niveau des bâtiments, aux districts, aux régions, jusqu'au niveau de la ville. L'originalité de ce projet se situe donc dans la proposition de techniques qui permettent de gérer les difficultés identifiées dans la gestion spatiale et temporelle des échelles des modèles hétérogènes dans leurs formalismes également.

Ainsi notre proposition d'outils pour le couplage dynamique des modèles va mener la réflexion principalement sur les propriétés clés des modèles en question à savoir : la dynamique du modèle qui évolue selon une temporalité bien déterminée représentée par le temps du modèle et l'espace qui caractérise le système réel d'un certain point de vue, différent d'un modèle à un autre. Ceci se traduit par l'explicitation des choix conceptuels pour assurer l'adaptation des modèles qui ne sont pas forcément conçus pour être couplés à d'autres modèles.

Dans notre étude bibliographique, nous avons trouvé qu'il existe beaucoup de concepts qui aident à maîtriser l'hétérogénéité spatiale et temporelle en modélisation multi-échelles. A partir de cette étude, nous avons construit une architecture multi-agents organisationnelle de type holonique qui vise à contrôler dynamiquement le changement des échelles spatiales des processus impliqués dans un système spatial complexe. Ainsi dans le métamodèle de couplage proposé dans le cadre de cette thèse, l'hétérogénéité des échelles spatiales sera appréhendée par la décomposition des agents pour atteindre le niveau d'abstraction souhaité.

Cette architecture multi-agents cherche également à proposer une bonne gestion du temps de simulation qui permet de prendre en compte de multiples politiques d'exécution (événements, pas de temps variables). Ainsi le système multi-agents de couplage assurera l'ordonnancement des dates d'exécution des modèles dans un chronogramme commun à tous les modèles.

En plus de l'hétérogénéité spatiale et temporelle le métamodèle multi-agents sera construit entre autres pour gérer l'hétérogénéité des formalismes des modèles par l'encapsulation des modèles dans des agents. Ceci offre un cadre conceptuel permettant de réaliser un couplage sans modifier les modèles de départ et de s'extraire ainsi du code qui décrit les modèles [Fia01].

4.4.2 Utiliser l'espace comme facteur de couplage

Les interactions entre les modèles font intervenir un certain nombre de choix de couplage qu'il est nécessaire d'expliciter. Nous proposons dans cette approche d'utiliser l'espace comme facteur de couplage. Rappelons que nous employons le terme de "facteur de couplage" pour désigner l'élément commun entre les modèles qui sera utilisé pour leur permettre de partager leurs différentes données et représentations.

Un composant actif dans les systèmes complexes spatiaux

Une étude des modèles représentant un système complexe spatial nous permet de remarquer que le composant principal sur lequel se basent tous les modèles est l'espace. En partant de ce principe, l'espace peut constituer un facteur de couplage pour les modèles du système complexe étudié. Par ailleurs, l'analyse de la complexité de ces systèmes que nous avons établi dans l'état de l'art (cf. section 1.2.1 page 4), stipule que ces systèmes sont caractérisés par des propriétés d'auto-organisation et d'émergence [LeM99] à prendre en considération lors de l'élaboration de notre démarche de couplage. Pour cela, dans l'étude des phénomènes spatiaux, généralement l'espace n'est jamais considéré comme une structure stable à expliquer, à décrire ou à synthétiser, mais plutôt comme un composant actif qui intervient forcément dans le déroulement de l'activité étudiée.

Dans les modèles dynamiques, l'espace n'est plus utilisé comme un support passif qui participe juste à la définition des comportements des composants du système complexe mais en plus comme le produit des interactions de ces composants [BG99a]. Dès lors l'environnement devient un sous-système du système complexe étudié, avec sa dynamique propre et son organisation spatiale qui sera le produit des différentes sorties des modèles. Ce sous-système permet donc de définir la nouvelle organisation spatiale résultant de l'émergence ou la disparition de certains phénomènes en certains lieux [San01]. D'un autre côté il va jouer le rôle de support des interactions entre les dynamiques d'un système donné dans différents lieux [BG99a].

Notons que dans notre approche, en plus du service de transport des messages, l'espace est également pensé comme un ensemble d'agents représentant les entités de l'environnement étudié. L'environnement de notre modèle sera donc composé d'entités actives possédant des propriétés et des comportements spécifiques. Par conséquent il va falloir déterminer les agents de cet environnement et la manière avec laquelle ils interagissent avec les modèles à coupler.

Ces interactions entre les modèles contribuent à leur tour dans la construction de nouvelles structures spatiales et ont des incidences sur les relations entre les lieux ou les sous-éléments de l'espace.

Le médium des interactions entre les modèles à coupler

Notre approche de couplage se distingue donc par le rôle accordé à l'espace considéré comme l'élément central dans le processus d'échange entre les modèles. Nous nous basons sur des observations faites sur les dynamiques spatiales pour considérer l'espace comme un support des interactions entre les modèles à coupler. L'idée est donc d'utiliser l'espace pour qualitativement mieux intégrer les contraintes spatiales du couplage et l'inter-influence réciproque entre l'espace et les différents modèles qui agissent et subissent les changements effectués sur l'espace du système complexe spatial étudié.

En effet, lorsque plusieurs modèles agissent sur le même système, ils peuvent provoquer le changement des valeurs utilisées comme paramètres par d'autres modèles. Ceci peut avoir des répercussions sur le comportement de ces modèles. L'espace permet ainsi de stocker les changements effectués par tout modèle du système qui peuvent être lus par les autres modèles avant chaque exécution ce qui assure la cohérence du système global étudié. Ainsi, l'espace sera modélisé comme étant l'entité qui enregistre toutes les sorties des modèles et sur laquelle on peut observer le résultat du couplage.

D'autre part, étant donné que nous avons opté pour une approche multi-agents, l'environnement constitue naturellement un support de communication dans ce type de système [FER95]. En effet, dans les systèmes multi-agents, l'environnement est perçu par les agents d'une manière limitée mais ce dernier a connaissance de tous les agents présents en son sein [Fer97] qui agissent dessus et interagissent au travers.

Ainsi dans notre approche, l'espace sera utilisé comme le médium des interactions entre les agents de couplage pour leur permettre de co-exister et d'interagir selon un ensemble de règles qui régissent ces interactions [WOO07]. Ces règles permettent d'éviter les situations de conflits dans lesquelles les agents intentent des actions simultanément au même endroit. Cette représentation est celle adoptée par plusieurs plateformes de simulations orientées agents comme CORMAS [BBPL98] qui utilise l'espace comme support de communication entre les agents. Dans ce qui suit, nous allons montrer comment les interactions entre agents, qui se font par l'intermédiaire de l'espace, vont permettre de coupler les modèles.

4.4.3 Un système multi-agents pour faire interagir les modèles

Les systèmes multi-agents représentent une approche intéressante pour l'analyse, la conception et l'implantation des systèmes complexes spatiaux. Comme indiqué dans les précédents chapitres, les modèles orientés agents se prêtent particulièrement bien à la modélisation et la vérification de certaines hypothèses portant sur le fonctionnement des systèmes complexes spatiaux que nous voulons traiter dans le cadre de cette thèse.

En effet, les domaines des systèmes complexes qui font face à des phénomènes collectifs, pour lesquels il est nécessaire de mettre en place une correspondance entre les représentations dynamiques que les entités ont de l'espace et les contraintes que la collectivité leur impose, utilisent le paradigme multi-agents dans leurs études [AP06b]. Face à l'incapacité des méthodes de modélisation basées sur des équations à représenter des composants hétérogènes, leur environnement et leurs interactions, les approches multi-agents se sont largement développées dans le domaine

de la modélisation spatiale multi-échelles.

Notons également que la théorie AMAS (Adaptive Multi-Agents Systems) [CGGG03] stipule que le fonctionnement de la technologie des systèmes multi-agents repose sur des mécanismes d'auto-organisation coopératifs correspondant aux propriétés d'auto-organisation et d'émergence des systèmes complexes spatiaux. En effet, le paradigme multi-agents, de part les possibilités méthodologiques et techniques qu'il offre, nous apporte des solutions pertinentes pour gérer la cohérence du métamodèle de couplage lors de l'échange des données entre les modèles. Ceci revient à certaines propriétés spécifiques à ce type de systèmes comme les principes de communication, d'auto-organisation et de coopération entre les agents où l'espace est entièrement intégré [GMP⁺96]. Plus particulièrement, pour justifier le recours aux systèmes multi-agents nous énumérons dans ce qui suit les besoins fonctionnels pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux ainsi que les réponses qu'offrent les systèmes multi-agents :

- Interactions coopératives entre les modèles à coupler : nous avons besoin d'un paradigme qui permet aux modèles couplés de coopérer ensemble pour observer l'évolution des différentes dynamiques d'un système complexe spatial. Cette propriété de coopération existe dans les systèmes multi-agents où les agents peuvent travailler ensemble pour la résolution d'un but commun ;
- Un ensemble d'entités en interaction ayant des propriétés spatiales : par définition un système complexe spatial est formé d'un ensemble d'entités qui ont des propriétés spatiales et sont situées dans un environnement. Cette définition correspond parfaitement bien aux caractéristiques des systèmes multi-agents qui sont formés par des agents [FDB97] représentant les entités actives du système situés dans un environnement. Par ailleurs, les SMA permettent une représentation descriptive des espaces et l'ajout des processus qui évoluent dans cet espace ;
- Émergence de nouvelles structures spatiales : à partir des activités collectives entre les modèles il est possible d'observer l'émergence de nouvelles structures imprévisibles et absentes aux niveaux inférieurs. Les systèmes multi-agents qui reposent sur les principes d'auto-organisation permettent d'illustrer l'émergence des organisations spatiales en respectant un ensemble de contraintes spatiales ;
- Ajout, suppression de modèles : lors du couplage il est souvent nécessaire de changer facilement de modèles pour représenter le système complexe spatial. A ce niveau, les agents permettent d'encapsuler les modèles comme des boîtes noires ce qui permet de changer des modèles et d'assurer plus de générnicité à notre approche ;
- Forte capacité de perception de l'environnement : le comportement d'un agent se caractérise par une grande capacité à percevoir tout type d'agent ou d'objet donné de l'environnement et par des capacités de raisonnement associées.

Pour toutes ces raisons, la modélisation des systèmes complexes par le couplage des modèles existants qui utilise le paradigme agent comme moyen de faire interagir les modèles spatiaux, nous parait une bonne voie à explorer. Cependant, faire du couplage en utilisant les agents soulève de nombreux verrous comme :

- La distribution du fonctionnement du système complexe spatial : pour assurer la distribution des données et du contrôle du système, les agents doivent être capables d'interagir de manière autonome [JCL⁺96a]. En cela l'approche agent vient compléter le panel des approches de modélisation possibles en offrant des mécanismes adaptés à la modélisation des systèmes distribués ;
- Les règles de couplage : la nécessité de mettre en place un ensemble de règles de couplage exprimées dans un langage de haut niveau pour définir le comportement des agents chargés

- d'assurer le couplage. En effet, la conception de systèmes complexes à l'aide d'agents place le concepteur à un haut niveau d'abstraction et confère au système plus de robustesse dans la mesure où la distribution du contrôle sur plusieurs entités améliore l'efficacité et la réactivité du système grâce à des mécanismes sophistiqués de coordination ;
- La spécification des interactions : pour être adapté à la problématique du couplage, le système multi-agents doit suivre un ensemble de spécifications à la fois des modèles d'agents, de l'environnement utilisé comme facteur de couplage mais aussi des mécanismes d'interactions propres à la dynamique du système [FER95] ;
 - L'interprétation spatiale des résultats : il est nécessaire que les résultats obtenus par simulation soient observables et reproductibles. Ceci permet de valider la crédibilité scientifique de l'approche de couplage proposée.

D'un point de vue spatial, ces agents seront des agents spatiaux et sont, à ce titre, capables de manipuler l'information géographique et de moduler leur comportement en fonction des données spatiales dont ils disposent [ACaNN97]. La démarche développée se place dans la lignée des développements actuels des agents spatiaux pour parvenir à un couplage intelligent, susceptible d'accroître à la fois les capacités fonctionnelles et les performances du système global en bénéficiant des propriétés cognitives des agents. Nous souhaitons donc proposer une approche homogène et cohérente qui combine une vision conceptuelle issue du monde multi-agents avec les solutions techniques offertes par le domaine de couplage sans compliquer la tâche de couplage. En effet, une des contraintes de ce travail est de ne pas ajouter de difficultés en plus de celles inhérentes à l'interdisciplinarité de ce travail où plusieurs modélisateurs issus de domaines scientifiques différents doivent interagir afin de créer un modèle couplé global [Sie11].

Pour conclure nous dirons que les systèmes multi-agents sont particulièrement bien adaptés pour traduire d'autres caractéristiques sous-jacentes aux systèmes complexes comme : l'aspect multiéchelle, l'émergence des nouvelles propriétés, etc. En effet, la coévolution et l'auto-organisation des agents facilitent la modélisation de dynamiques multi-échelles dans la mesure où la dynamique globale du système est au-delà de la simple addition des fonctionnalités des agents mais elle émerge plutôt des interactions au niveau local entre les différents agents [HRR98]. Le système multi-agents de couplage doit entre autres collecter et spatialiser les données des modèles ce qui fait de l'espace un composant important à prendre en considération dans l'approche de couplage.

4.4.4 Un outil méthodologique et conceptuel pour une intervention pluridisciplinaire sur l'espace

Si la réutilisation des modèles fait gagner du temps lors de la modélisation des systèmes complexes spatiaux, elle pose néanmoins certaines difficultés au moment du couplage des modèles. Comme cela a été explicité dans la section précédente, la modélisation des systèmes complexes spatiaux fait face à des phénomènes d'inter-influences qui nécessitent de tenir compte simultanément de plusieurs données à différents niveaux d'abstraction et l'intervention de plusieurs équipes de modélisateurs sur un même espace partagé. Pour répondre à ces besoins, notre contribution va consister dans le cadre de cette thèse à soulever des verrous scientifiques concernant d'un côté la réutilisation des modèles ainsi que l'aspect multi-échelles et l'hétérogénéité des formalismes des modèles d'un autre côté.

L'apport de la recherche se situe donc dans la définition d'une approche orientée agent assurant les échanges du modèle avec l'espace et par la suite avec les autres modèles. Il s'agit en effet d'une architecture spécifique qui s'organise en groupes d'agents et utilise le concept de rôle

pour la représentation de comportements et d'interactions multiples des agents tout en prenant en considération les propriétés du contexte géographique de l'environnement. L'approche décrite dans ce document vise donc à utiliser les prédispositions intrinsèques de l'approche holonique (cf. section 3.4.1.2 page 58) pour la modélisation des systèmes complexes et hiérarchiques afin de les associer aux aspects modulaires de l'approche organisationnelle [Gau07].

L'objectif recherché par la combinaison de ces deux points de vue est de pouvoir observer, analyser et décomposer un système complexe donné. Plus particulièrement, l'architecture organisationnelle hiérarchique que l'on propose se base sur le principe de la décomposition d'un système niveau par niveau. Par la suite, ces organisations sont identifiées et spécifiées grâce aux concepts d'agent, rôle, groupe, environnement (AGRE). Comme les modèles à coupler sont hétérogènes et traitent des données de nature différente, il semble inutile de laisser des agents, qui n'utilisent pas le même type de données, communiquer entre eux. Ainsi grâce au concept du groupe, les agents limitent leurs communications aux agents de leur groupe. Ce qui explique le recours à une structure organisationnelle.

Ainsi le système holonique sera formé d'agents autonomes qui cherchent à être coopératif avec les autres agents de leur groupe du système et avec l'espace du système complexe étudié [Geo04]. En dotant ces agents de mécanismes de décomposition en sous-holons, nous obtenons un système capable de d'auto-organiser et de s'adapter continuellement à la tâche requise par le modélisation (i.e. de s'auto-programmer suivant les besoins) [Geo04]. Grâce à ces concepts on peut observer que la dynamique globale du système émerge à partir des dynamiques des modèles élémentaires développés par rapport à une question particulière. Nous avons délibérément fait le choix de rester dans le domaine de la modélisation spatiale en vue de proposer une approche qui favorise la modélisation des systèmes complexes spatiaux par couplage de modèles qui soit utilisable par les thématiciens de l'étude. Il est donc nécessaire de fournir une solution simple basée sur un métamodèle qui capte toute la complexité du système étudié et qui sera intégré au sein d'une méthodologie qui spécifie le processus du couplage sous forme de phases et de livrables à produire dans chaque phase.

En effet, la mise en place d'une méthodologie permet de définir une collection de méthodes qui relient les différentes étapes d'un processus [Gau07]. Ainsi l'objectif de notre méthodologie est de guider le modélisateur dans le processus de couplage à travers un ensemble cohérent de phases à adopter pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux avec des livrables spécifiques. Par la suite, dans cette méthodologie le métamodèle est utilisé pour définir les abstractions nécessaires à la modélisation du problème et de sa solution [Gau07]. Ainsi dans cette approche organisationnelle, c'est le métamodèle de couplage qui spécifie le principe de composition de rôles qui permet à un holon de se décomposer en sous-holons pour assurer la décomposition du système et sa modélisation à différents niveaux d'abstraction. Dans ce travail de conception, il est également nécessaire de faire le choix d'un formalisme unique pour les modèles récupérés de la littérature, et d'un langage commun pour établir l'interopérabilité des modèles, etc. Le travail présenté dans ce document montre la faisabilité de tels concepts en spécifiant, puis en soumettant à expérimentation, une approche de couplage orientée agent et basée sur l'espace.

Pour conclure, notre approche offre un couplage de modèles de type fort et hiérarchique qui facilite la modélisation des phénomènes d'inter-influences à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces phénomènes seront intégrés sous forme de modèles qui peuvent former un système complexe spatial en agissant tous ensemble sur l'espace considéré. Nous expliciterons dans la section suivante, les spécificités de l'exemple fil rouge qui permettra d'illustrer l'utilisation des concepts proposés dans le cadre de cette thèse.

4.5 Un exemple fil rouge

La démarche utilisée tout au long de cette partie consiste à illustrer les différents concepts énoncés par des modèles délibérément simples issus de travaux existants. Le but recherché est de se mettre à la place d'une personne qui construit un modèle couplé à partir de modèles existants qu'elle ne maîtrise pas totalement. Ainsi nous chercherons à travers cet exemple fil rouge à illustrer les aspects relatifs à l'expression des choix de couplage, la prise en compte de différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi que l'hétérogénéité des formalismes des modèles. Nous présentons dans ce qui suit notre exemple fil rouge avec plus de détails dans le but de justifier les choix des modèles à travers les critères auxquels ils obéissent.

4.5.1 Les modèles à coupler

Nous avons choisi de nous intéresser à l'étude de la croissance de la biomasse dans les zones vertes urbaines. Ce phénomène fait interagir plusieurs dynamiques à savoir les dynamiques de la biosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère. Pour cela il va falloir coupler au moins deux modèles : un modèle représentant le cycle de l'eau et un modèle représentant l'augmentation de la biomasse. Nous allons donc coupler deux versions simplifiées de deux modèles relativement bien connus par la communauté scientifique de la plateforme NetLogo [Wila] à savoir le modèle de pluviométrie [TW07] et le modèle de croissance des plantes issus des travaux de [Wilb]. Ces deux modèles décrivent des dynamiques évoluant à des échelles différentes qui représentent les interactions entre la plante et son environnement urbain (Fig. 4.3).

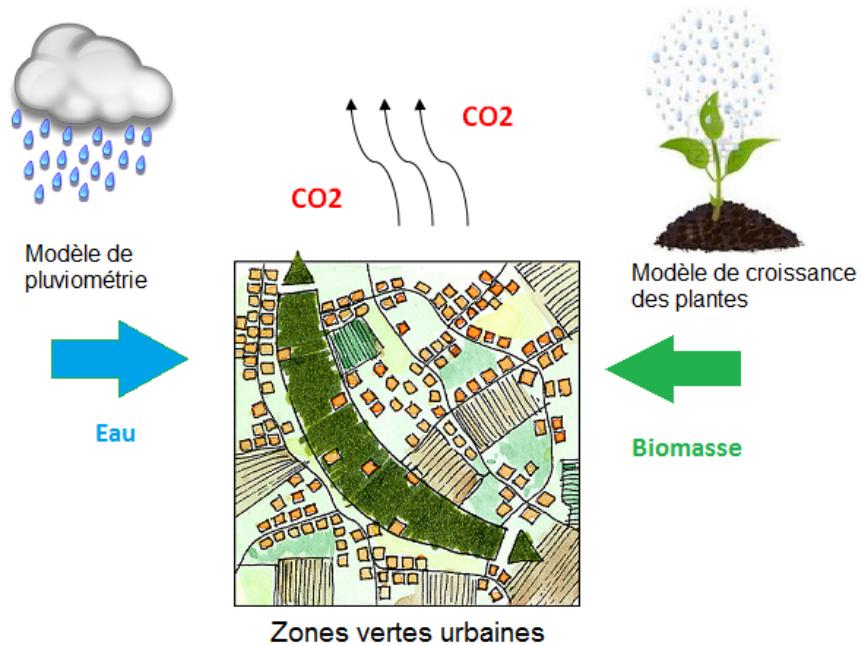


FIGURE 4.3 – Phénomène à modéliser dans l'exemple fil rouge

Le modèle pluviométrique a pour but de mesurer la pluviométrie en fonction de la quantité de CO_2 produite par la biomasse et par la ville. De l'autre côté, le modèle de croissance des

plantes va permettre de mesurer la biomasse produite dans les zones vertes urbaines en fonction des stocks d'eau trouvés dans le sol. L'espace sera représenté sous forme de grille de cellules. On a émis l'hypothèse que l'espace géographique étudié est une surface topographique plane, avec des pentes relativement faibles qui ne favorisent pas le ruissellement de l'eau.

Le modèle de pluviométrie

Dans le premier modèle, il nous faut estimer la pluviométrie de l'espace géographique choisi. La pluviométrie est exprimée en mm/m² avec 1 mm est équivaut à 1 litre d'eau. La quantité d'eau de pluie est calculée en fonction de la surface de l'espace géographique, du taux de pluviométrie annuelle tout en estimant que 10% de l'eau de pluie n'est pas récupérée. Ainsi le premier modèle de pluviométrie suit l'équation suivante :

Équation de pluviométrie

$$P(Q_{H2O}) = S_{Tot} * \alpha * 0.9 * \frac{1}{e^{Q_{CO2}}}$$

Équation de calcul de la quantité de CO₂ (Q_{CO2}) émise par la biomasse et la ville

$$E(Q_{CO2}) = Q_{Biomasse} * \theta_{CO2} + \lambda_{CO2}$$

Avec S_{Tot} la surface totale de l'espace considéré exprimée en m², Q_{H2O} la quantité d'eau produite par le modèle exprimée en mm, α le taux de pluviométrie de la région qui sera un nombre aléatoire exprimé en mm (par exemple *random* de 10mm) et Q_{CO2} la quantité de CO₂ produite dans l'atmosphère exprimée en Kg. Les entrées du modèle de pluviométrie, qui sont la surface totale considérée S_{Tot} et la quantité Q_{BIOM} , seront récupérées de l'espace.

En effet, la quantité de CO₂ émise sera calculée en fonction de la quantité de biomasse Q_{BIOM} produite par le modèle de croissance des plantes, du taux θ_{CO2} qui exprime la quantité de CO₂ produite par un kg de biomasse et de la quantité de CO₂ produite par la ville λ_{CO2} qui sera une constante exprimée en kg uniformément déposée chaque jour dans les cellules de la grille qui forme l'espace. Notons que cette équation sera utilisée plus tard dans une base de connaissances pour la transformation des données non spatiales (Q_{CO2}) en des données spatiales (Q_{BIOM}). Par ailleurs, la sortie du modèle Q_{H2O} sera stockée dans l'espace. Cette quantité est intégrée au niveau de l'espace à des quantités égales dans chaque cellule de l'espace.

Le modèle de croissance des plantes

Le second modèle répond à la question de savoir comment une plante est capable de localiser efficacement les ressources dans son environnement, se concentrant généralement sur la principale ressource qui est l'eau. La croissance des plantes est mesurée en quantité de biomasse produite qui est fonction de la quantité d'eau produite et du taux de consommation en eau de la surface considérée. Ainsi le deuxième modèle de croissance des plantes suit l'équation suivante :

Équation de la croissance des plantes

$$F(Q_{BIOM}) = Q_{BIOM} * (1 + Q_{H2O} * \tau_{Cul} * S_{Cul})$$

Avec Q_{BIOM} quantité de biomasse produite par le modèle initialisée à une valeur aléatoire, Q_{H2O} la quantité d'eau récupérée de l'espace, τ_{Cul} taux de consommation en eau de la culture ayant la surface S_{Cul} exprimée en m². Les entrées du modèle de croissance des plantes, qui sont la surface de la culture S_{Cul} , son taux de consommation en eau τ_{Cul} et la quantité Q_{H2O} , seront récupérées de l'espace. La sortie du modèle Q_{BIOM} qui correspond à la quantité de biomasse,

est intégrée au niveau de l'espace en fonction de la culture à laquelle appartient chaque cellule. Ceci revient au fait que la quantité de biomasse produite est dépendante de la consommation en eau de chaque culture.

4.5.2 Justification du choix des modèles

Cet exemple fil rouge constitue un cas d'étude intéressant dans la mesure où le domaine duquel proviennent les modèles est en relation avec la modélisation spatiale. En effet, les modèles choisis seront corrélés en utilisant l'espace qui constitue le support commun de leurs échanges. Ces deux modèles sont également hétérogènes de plusieurs points de vue : paradigmes, représentations du temps et de l'espace, etc. Nous reprenons ces justificatifs avec plus de détails dans ce qui suit.

Corrélation spatiale des modèles

D'après cette description, nous déduisons que les modèles peuvent être corrélés en utilisant l'espace étant donné que la croissance des plantes dépend de la quantité de pluie déversée dans l'espace et cette quantité de pluie dépend de la quantité de vapeur d'eau émise dans l'air par les cultures plantées dans le sol (Fig. 4.3). L'espace constitue donc le facteur de couplage entre les deux modèles qui leur permet d'interagir. En effet, dans cette modélisation, l'espace est support des ressources qui permettent la croissance des plantes à savoir la quantité Q_{H2O} et des facteurs influant sur les quantités de pluies comme la quantité Q_{BIOM} qui permet de calculer les quantités de Q_{CO2} . En revanche, les données géographiques utilisées par les deux modèles sont différentes. Le modèle de croissance des plantes manipulera essentiellement les entités géographiques élémentaires à savoir les parcelles des différentes cultures tandis que le modèle de pluviométrie considérera l'espace géographique dans sa globalité.

Différence des échelles des modèles

Ces modèles évoluent à des échelles spatiales et temporelles différentes. En effet, le modèle pluviométrique est un modèle à événements discrets qui suit une loi de poisson. L'occurrence des événements de la pluviométrie X suit la distribution suivante :

La loi de Poisson de paramètre λ

$$P(X = k) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}$$

Le modèle de croissance des plantes est, quant à lui, un modèle à pas de temps discret où chaque pas de temps représente une journée dans le monde réel. Par rapport à l'échelle spatiale, on note également une différence au niveau des deux modèles. Si le modèle pluviométrique a pour échelle la totalité de l'espace considéré (la région), le modèle de croissance des plantes agit à l'échelle de la parcelle, où dans chaque parcelle on définit une culture avec une consommation d'eau différente.

L'exemple fil rouge choisi apporte des preuves de concept au travers d'un cas particulier de système complexe spatial qui va accompagner toutes les étapes suivantes de la structuration de notre approche de couplage afin de mieux l'expliquer.

4.6 Synthèse et discussion

Dans ce chapitre, nous avons classé les modèles et les plateformes de couplage trouvées dans la littérature en utilisant l'outil de sériation des données BSK [Bel14] basé sur le scalogramme

de Guttman [Gut44]. Cette synthèse a pour but de nous permettre de nous positionner par rapport aux approches existantes. Notons que ces approches ne proposent pas de solutions conceptuelles qui répondent à toutes les caractéristiques des systèmes complexes spatiaux à savoir l'hétérogénéité des formalismes et l'aspect multi-échelles des modèles choisis.

Nous garderons de ces approches de couplage conçues dans des expériences antérieures, l'idée d'utiliser l'espace comme facteur de couplage étant donné qu'on cherche à modéliser des systèmes complexes spatiaux où l'espace est considéré comme une partie intégrante du système entier ainsi que l'utilité de mettre en place un système d'interfaçage basé sur le paradigme agent pour gérer les interactions entre les modèles. Ce système devra respecter les contraintes de réutilisation, de modularité, d'hétérogénéité, d'interopérabilité et de la différence des échelles spatiales et temporelles des modèles.

Dans ce cadre nous proposons une approche de couplage organisationnelle de type holonique basée sur l'espace et le paradigme agent pour assurer le couplage des modèles qui représentent le système complexe spatial étudié. Par ailleurs, un exemple fil rouge formé par deux modèles hétérogènes multi-échelles (un modèle de pluviométrie et un modèle de croissance des plantes) a été introduit afin d'illustrer les conséquences des choix théoriques effectués lors de la construction de notre approche de couplage. Nous avons commencé dans ce chapitre par expliciter les questions auxquelles notre proposition est capable de répondre. Nous continuerons le développement et l'illustration des concepts relatifs à notre approche dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Coupling4modeling : une approche de couplage pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux

Sommaire

5.1	Introduction	95
5.2	Fondements de l'approche proposée	96
5.2.1	Notre système de couplage selon l'approche VOYELLES	96
5.2.2	La théorie de la stigmergie pour la coordination via l'environnement	97
5.2.3	Une architecture organisationnelle hiérarchique	98
5.3	Coupling4modeling : structure et fonctionnement	101
5.3.1	L'hétérogénéité des échelles spatiales	101
5.3.2	Les temporalités des modèles à coupler	103
5.3.3	Le métamodèle de couplage	107
5.3.4	Du métamodèle à la méthodologie de couplage	111
5.4	Une méthodologie de couplage de modèles	111
5.4.1	Analyse des modèles et de l'espace	112
5.4.2	Construction de la base de connaissances spatiales	113
5.4.3	Corrélation des modèles via l'espace	114
5.4.4	Conception du modèle couplé	115
5.4.5	Encapsulation des modèles	116
5.4.6	Implantation des agents en charge du couplage	117
5.4.7	La démarche de couplage appliquée à l'exemple fil rouge	118
5.5	Synthèse et analyse de l'approche adoptée	120

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons préciser davantage le champ de notre intervention dans le domaine de la modélisation des systèmes complexes spatiaux. On s'intéresse particulièrement aux concepts de base utilisés pour construire une approche de modélisation de tels systèmes par couplage de modèles. A ce niveau nous souhaitons pouvoir coupler des modèles hétérogènes

autonomes et multi-échelles de façon décentralisée sans avoir à introduire d'entité centrale en charge du contrôle du processus de couplage.

Comme nous avons opté pour un couplage à base d'agents, ce système multi-agents doit intégrer la notion de hiérarchie afin de pouvoir modéliser les interactions entre les différentes composantes du système et de comprendre les phénomènes émergents qui en découlent. Pour toutes ces raisons notre choix s'est porté sur les systèmes multi-agents holoniques [Gau07] qui peuvent offrir une alternative intéressante à ce problème.

Plus particulièrement, le métamodèle de couplage proposé dans le cadre de cette thèse se base sur la décomposition organisationnelle de type hiérarchique d'un système complexe spatial donné. En effet, ces systèmes s'avèrent très efficaces pour gérer la nature hétérogène et multi-échelles des composantes du système complexe spatial [Gau07]. Ceci revient à la capacité des agents holoniques à se regrouper pour créer un agent de niveau supérieur ou à se décomposer pour créer des agents de niveau inférieur. Nous détaillerons davantage les concepts relatifs aux systèmes holoniques tout au long de ce chapitre.

Par ailleurs, la formalisation de notre approche de couplage Coupling4modeling se traduit par la construction d'une démarche de couplage qui comprend l'élaboration d'un métamodèle, le choix d'un langage de modélisation et la spécification d'une méthodologie de couplage. Cette dernière détermine un ensemble d'étapes à suivre pour concevoir un modèle de couplage.

Nous montrerons à la fin de ce chapitre comment notre approche permet de satisfaire toutes les contraintes relatives à l'opération de couplage citées précédemment à savoir l'hétérogénéité, la modularité, l'interopérabilité, la réutilisation et la gestion des échelles des modèles. Par ailleurs, pour illustrer ces concepts théoriques nous utiliserons l'exemple fil rouge présenté dans le chapitre précédent, afin de montrer comment notre approche permet d'aborder les difficultés de couplage particulièrement par rapport au transfert d'échelles entre des modèles hétérogènes.

5.2 Fondements de l'approche proposée

Coupling4Modeling est une approche de couplage qui permet d'associer différents modèles qui représentent des phénomènes complexes à différentes échelles. Cette approche se base sur un ensemble de notions qui permettent de la formaliser et assurent ainsi sa réutilisation par d'autres modélisateurs. Le but de cette section est de préciser les concepts et les techniques utilisés pour la formalisation de notre approche de couplage dédiée aux systèmes complexes spatiaux.

5.2.1 Notre système de couplage selon l'approche VOYELLES

L'idée directrice qui a présidé à la proposition de Coupling4modeling repose sur la conception d'un système multi-agents comme une "*société de modèles en interaction*" [Sie11] dont le rôle va être de gérer l'ensemble des problèmes liés à la problématique du couplage. Nous présentons donc dans cette section, un premier aperçu de notre métamodèle qui explique comment faire interagir les modèles à coupler. Pour ce faire nous nous référons à l'approche VOYELLES relative à la modélisation spatiale formulée par Yves Demazeau [Dem95]. Le système multi-agents est ainsi conçu selon quatre dimensions dépendant étroitement les unes des autres (Fig. 5.1) :

- Agent : notre système multi-agents de couplage est composé d'un ensemble d'agents représentant chacun des modèles à coupler. Ainsi un ensemble d'agents sera créé pour gérer chaque modèle couplé à travers l'espace. Parmi ces agents on trouvera un agent chargé de l'encapsulation du modèle, d'autres agents assureront la collecte, la spatialisation et l'ordonnancement du modèle. Par ailleurs, nous ne mettons aucune contrainte sur le nombre

- des agents impliqués dans le processus de couplage ;
- Environnement : l'environnement caractérise l'espace réel en combinant les représentations spatiales notamment les SIG ou les grilles. Chaque entité spatiale est caractérisée par un ensemble de propriétés sur lesquelles s'appuient les agents pour prendre des informations sur l'espace ;
 - Interaction : les agents relatifs au même modèle communiquent directement entre eux. Tandis que les agents non associés au même modèle communiquent par des interactions indirectes en agissant sur leur environnement. C'est en interagissant entre eux que les agents de couplage permettent de gérer l'ensemble des problèmes du couplage en l'occurrence les changements d'échelles des modèles ;
 - Organisation : nous construisons ce méta-modèle comme un système multi-agents en utilisant la structure organisationnelle AGRE (Agent, Groupe, Rôle, Environnement) [FB05] où chaque groupe correspond à un seul modèle. Ce groupe contient les éléments nécessaires au couplage du modèle.

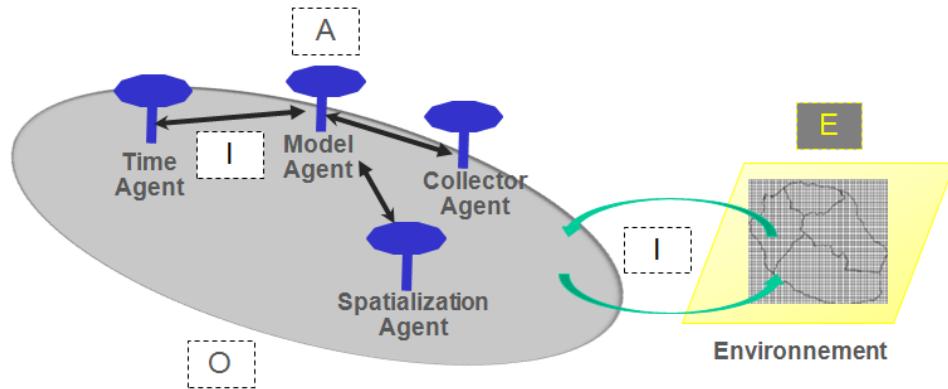


FIGURE 5.1 – Présentation de notre système de couplage selon l'approche VOYELLES

Ce système multi-agents ainsi construit nous offre un cadre de modélisation qui permet de respecter les règles de couplage exprimées dans un niveau plus élevé [Fia01], sans changer les modèles d'origine. Dans ce qui suit, nous introduisons la notion de la stigmergie qui permet d'assurer la coordination et la collaboration entre les groupes d'agents représentant les modèles à coupler.

5.2.2 La théorie de la stigmergie pour la coordination via l'environnement

Notre approche exploite la notion de trace d'agent, inspirée de la théorie de stigmergie [Gra59]. Cette théorie se base sur le principe de communication indirecte où les individus communiquent entre eux en modifiant leur environnement. Les travaux récents sur les modèles qui utilisent le principe de l'interaction indirecte stipulent que l'environnement constitue ainsi un tableau noir dans lequel les agents déposent des informations (action) et observent l'environnement (perception) [CdIM01].

Si on transpose cette notion à notre système de couplage, on peut dire que les agents relatifs à chaque modèle interagissent en modifiant leur environnement par envois de messages indépendamment des formalismes respectifs des modèles. Nous distinguons entre deux types d'agents : les agents qui lisent à partir de l'environnement, perçus comme des capteurs et basés sur la

perception passive des informations provenant de l'environnement et les agents capables d'agir directement sur l'espace afin d'y intégrer les informations à communiquer au reste des modèles [Sab09].

Pour cela, il est important d'expliciter la différence entre les données privées du modèle liées aux processus internes du modèle et les données publiques qui seront visibles dans l'environnement et qui peuvent constituer les entrées des autres modèles. Notons que dans les SMA adoptant cette approche, l'accent est mis sur l'émergence d'un comportement. En effet, dans notre cas le résultat global de ces interactions permet d'avoir une vue globale sur le système complexe spatial étudié. Nous présentons dans la section suivante l'architecture orientée agent qui nous permettra d'intégrer l'ensemble de ces concepts et notions.

5.2.3 Une architecture organisationnelle hiérarchique

Coupling4Modeling favorise le couplage des modèles en proposant une architecture orientée agent qui prend en considération la particularité, l'autonomie et l'échelle de calcul de chaque modèle. Nous reprenons dans ce qui suit avec plus de détails la composante "organisation" dans l'approche voyelles [Dem95] où on a opté pour une organisation de type AGRE [FB05].

5.2.3.1 Une approche organisationnelle de type AGRE

Comme l'a souligné J. Ferber [FGM04], l'approche organisationnelle offre un grand nombre d'avantages et peut contribuer au développement des outils orientés agents dans les points suivants : hétérogénéité des langages, modularité, multiplicité des architectures, sécurité des applications, etc.

L'objectif de ce travail consiste donc à essayer de rassembler les avantages des approches organisationnelles AGRE (Fig. 5.1) ainsi que ceux de la vision holonique [Gau07] dans la modélisation des systèmes complexes hiérarchiques. Dans cette organisation AGRE, les concepts primitifs (Agent, groupe, rôle, environnement) seront structurellement connectés et spécifiés dans le cadre de la problématique du couplage de la manière suivante (Fig. 5.1) :

- 1 *Agent* : il s'agit d'une entité active qui peut jouer différents rôles dans le processus de couplage. Ces rôles permettent aux agents d'assurer les échanges entre les modèles de jouer le rôle d'intermédiaires de couplage ;
- 2 *Rôle* : on distingue 4 rôles majeurs à savoir [HLMT12] : l'exécuteur du modèle (*Model Agent* (Fig. 5.1), le contrôleur du temps du modèle (*Time Agent* (Fig. 5.1), le collecteur (*Collector Agent* (Fig. 5.1) et le responsable de la spatialisation (*SpatializationAgent* (Fig. 5.1) des sorties du modèle ;
- 3 *Groupe* : on trouve dans chaque groupe les agents avec tous les rôles nécessaires au couplage du modèle. Dans cette organisation chaque groupe d'agents correspond toujours à un seul modèle ;
- 4 *Environnement* : le composant qui va permettre aux groupes d'agents de communiquer ensemble étant donné que les modèles n'interagissent pas ensemble directement.

Même si l'organisation AGRE [FB05] permet de modéliser un système à différents niveaux d'abstraction elle ne spécifie pas explicitement comment ces organisations situées à des niveaux d'abstraction différents interagissent ensemble. Pour réduire ce manque de flexibilité, nous proposons de faire évoluer cette organisation vers une architecture moins rigide, auto-organisée et hiérarchique pour représenter les différents niveaux d'abstraction des systèmes complexes spatiaux auxquels nous nous intéressons.

5.2.3.2 Une structure holonique hiérarchique

Nous proposons de modéliser la hiérarchie des différents niveaux d'abstraction du système complexe spatial étudié en utilisant une structure holonique. Cette notion d'holons permet de définir une hiérarchie organisationnelle explicite par la décomposition d'agents en sous-holons. Ceci permet de remplacer un ensemble d'agents par un agent de niveau supérieur [Gau07]. Le système ainsi obtenu forme ce qu'on appelle une holarchie [Gau07].

Nous reprenons ces concepts du métamodèle CRIOD [Gau07] (basé lui-même sur une organisation holonique de type AGR) pour les adapter à notre problématique de couplage qui intègre la dimension de l'espace. Le système holonique permet de faciliter l'extension, la différence des échelles spatiales entre les modèles et la maintenabilité du système complexe de façon modulaire en utilisant l'espace comme facteur de couplage.

A partir de ces choix conceptuels nous proposons une architecture de couplage organisationnelle et holonique pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux. Cette architecture s'articule autour de quatre parties majeures (Fig. 5.2) :

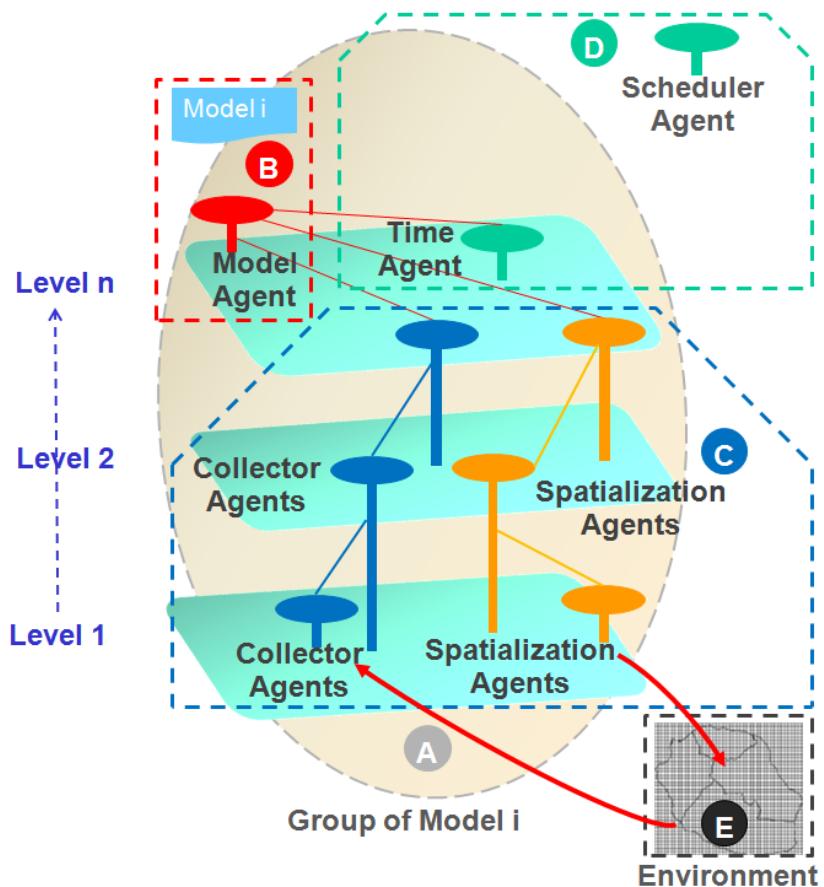


FIGURE 5.2 – Architecture du métamodèle

A - *L'organisation des agents* (Group-section (A) Fig. 5.2) : comme indiqué précédemment, pour faciliter la modélisation d'un phénomène spatial pouvant être représenté par différents modèles, il nous paraît intéressant de modéliser chaque dynamique par un groupe d'agents.

Chaque groupe rassemble tous les éléments nécessaires à l'exécution d'un modèle et à sa spatialisation. Par ailleurs, les groupes communiquent ensemble en utilisant l'espace comme facteur de couplage et non un agent du groupe (Fig. 5.3). Au cours du processus d'instanciation un rôle peut être instancié plusieurs fois au sein d'un même groupe (*Model Agent, Time Agent, Collector Agent, Spatialization Agent*). L'ensemble de ces rôles sera détaillé dans ce qui suit ;

- B - *Modèles à coupler* (*Model Agent* – section (B) Fig. 5.2) : chaque modèle couplé est encapsulé dans un agent spécifique *ModelAgent*. Il s'agit du super-holon à partir duquel sont créées tous les autres agents. Il a pour rôle de formuler des demandes de collecte des entrées à partir de l'espace, l'exécution du modèle et finalement la récupération des sorties du modèle à spatialiser par l'agent de spatialisation *SpatializationAgent*. Notons que les données non spatiales seront interprétées par cet agent grâce à la base de connaissances spatiales conçue à cet effet. Par ailleurs, l'exécution du modèle sera contrôlée l'agent *Time-Agent* ;
- C - *Gestion des échelles spatiales* (*Collector Agents, Spatialization Agents* – section (C) Fig. 5.2) : Les agents de spatialisation et les agents collecteurs *Collector Agents/ Spatialization Agents* ont des règles de comportements spatiaux. Les agents de spatialisation modifient leur environnement tandis que les agents collecteurs perçoivent de manière objective toutes les modifications dans leur champ de perception. Le rôle de ces deux agents est de convertir respectivement les données disponibles à l'échelle de l'environnement en de nouvelles données traitables à l'échelle du modèle et les sorties générées à l'échelle du modèle pour les intégrer l'échelle de l'espace. Ces deux agents se comportent comme deux agents holons [Gau07]. En effet, les tâches associées à ces deux agents consistent essentiellement à comparer les échelles des modèles avec l'échelle de l'espace et à créer les agents collecteurs ou les agents de spatialisation appropriés pour assurer la collecte ou la spatialisation des données à l'échelle ciblée. La générnicité de ces deux agents permet de coupler des modèles qui fonctionnent à différentes échelles spatiales en utilisant un facteur de couplage unique qui est l'espace ;
- D - *Gestion des échelles temporelles* (*Time Agent, Scheduler Agent* – section (D) Fig. 5.2) : le rôle de l'agent *Time Agent* est de gérer le cycle de vie de l'agent modèle chargé d'exécuter le modèle. Tandis que le rôle de l'agent *Scheduler Agent* est de gérer le cycle de vie de l'ensemble de la simulation et spécialement le cycle de vie des agents *Time Agent* relatifs à chaque modèle. Le comportement de l'agent d'ordonnancement *Scheduler Agent* se base sur une gestion de temps de type événementielle. En effet, chaque nouvelle date d'exécution d'un modèle à coupler est considérée comme un événement. Néanmoins, le comportement de l'agent *Time Agent* garde assez de générnicité pour pouvoir calculer les dates futures de modèles qu'elles soient à pas de temps ou à événements discrets ;
- E - *L'espace* (*Environment* – section (E) Fig. 5.2) : il s'agit d'une représentation descriptive et explicite du territoire étudié. Cet espace peut être par exemple une base de données géographiques (SIG) ou une simple grille cellulaire. Chaque composant de l'espace se caractérise par un ensemble d'attributs. Les valeurs de ces attributs sont lues et modifiées durant la simulation par les modèles couplés. Cet espace constitue une base de stockage de données commune entre les modèles, ce qui permet de prendre en compte l'effet de chaque modèle sur les autres.

Grâce à cette architecture (présentée dans la figure Fig. 5.2), les modèles que nous cherchons à coupler sont capables d'évoluer de façon cohérente et les conséquences de ce couplage sont

observables sur l'espace. La gestion des échelles spatiales et temporelles des modèles à coupler constitue, dans le cadre du couplage de modèles de natures différentes, une des difficultés majeures à résoudre. Nous reprenons avec plus de détails ces deux aspects dans les sections suivantes.

5.3 Coupling4modeling : structure et fonctionnement

Comme indiqué précédemment, l'approche de modélisation proposée dans la cadre de cette thèse se base sur la hiérarchie organisationnelle d'un système complexe spatial donné. L'objectif recherché est d'associer les avantages de ces deux approches à savoir la modularité des approches organisationnelles avec la prédisposition des approches holoniques à modéliser des systèmes complexes hiérarchiques. En effet, dans un processus de couplage le modélisateur peut être souvent confronté à un problème de changement d'échelles spatiales et temporelles étant donné que les diverses représentations du système diffèrent d'un modèle à un autre, en fonction de la discipline à laquelle il appartient.

Nous explicitons dans ce qui suit les mécanismes mis en place pour soulever ces verrous scientifiques dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux. Par la suite, nous présentons les diagrammes UML utilisés pour structurer l'approche de couplage.

5.3.1 L'hétérogénéité des échelles spatiales

Quand on modélise la dynamique d'un système spatial, les différenciations spatiales jouent un rôle majeur dans l'évolution du système. Ainsi nous focaliserons notre attention dans cette section sur la gestion des échelles spatiales pour laquelle nous proposons des solutions conceptuelles basées sur un système multi-agents holonique.

En effet, pour gérer ce problème dans de tels systèmes, on utilise le concept d'holon qui définit une hiérarchie entre les agents appartenant au même groupe. Les agents (holons) permettent donc de passer d'une échelle à une autre en adaptant l'échelle spatiale de l'espace à l'échelle spatiale du modèle grâce à des fonctions de décomposition et de conversion. La figure (Fig. 5.3), représente un modèle *Mi* qui travaille à une échelle supérieure à l'échelle de l'espace.

Le modèle *Mi* dispose d'un agent modèle *Model Agent*, d'un agent collecteur *Model Collector Agent*, et d'un agent de spatialisation *Model Spatialization Agent* qui travaillent tous à l'échelle du modèle. Comme les données sont disponibles à l'échelle de l'espace. Les agents holoniques *Model Collector Agent*, et *Model Spatialization Agent* vont se décomposer respectivement en agents *Space Collector Agent*, et *Space Spatialization Agent*. Ainsi, le processus de changement d'échelles spatiales se déroule comme suit :

- 1 - La lecture des données se fait par l'agent *Space Collector Agent* qui travaille à l'échelle de l'espace ;
- 2 - Comme le modèle travaille à l'échelle de la zone, l'agent *Model Collector Agent* va se charger de la conversion des données collectées à partir de l'espace à l'échelle du modèle ;
- 3 - Une fois que l'agent *Model Agent* dispose des entrées à son échelle, il entame l'exécution de son modèle ;
- 4 - Par la suite l'agent *Model Spatialization Agent* se charge de la conversion des sorties du modèle à l'échelle de l'agent *Space Spatialization Agent* qui travaille à l'échelle de l'espace ;
- 5 - Une fois que l'agent *Space Spatialization Agent* dispose des sorties à son échelle, il se charge de l'écriture de ces données au niveau de l'espace.

Notons que les agents qui travaillent à une échelle particulière peuvent accéder aux informations contenues dans les échelles sous-jacentes. Ainsi, les données peuvent être synthétisées à n'importe quel niveau et transférées aux niveaux supérieurs alors que les demandes de haut niveau peuvent être filtrées et passées aux niveaux inférieurs pour diriger les agents qui œuvrent à ces niveaux. A chaque niveau hiérarchique, ces holons vont appliquer des fonctions de conversion (sommation des données, division des données, etc). Cette technique permet donc de transformer les données selon la granularité de l'information disponible au niveau de l'espace (Fig. 5.3) Dans ce qui suit, nous allons illustrer le déroulement de la gestion de la différence des échelles spatiales avec les deux modèles de notre exemple fil rouge.

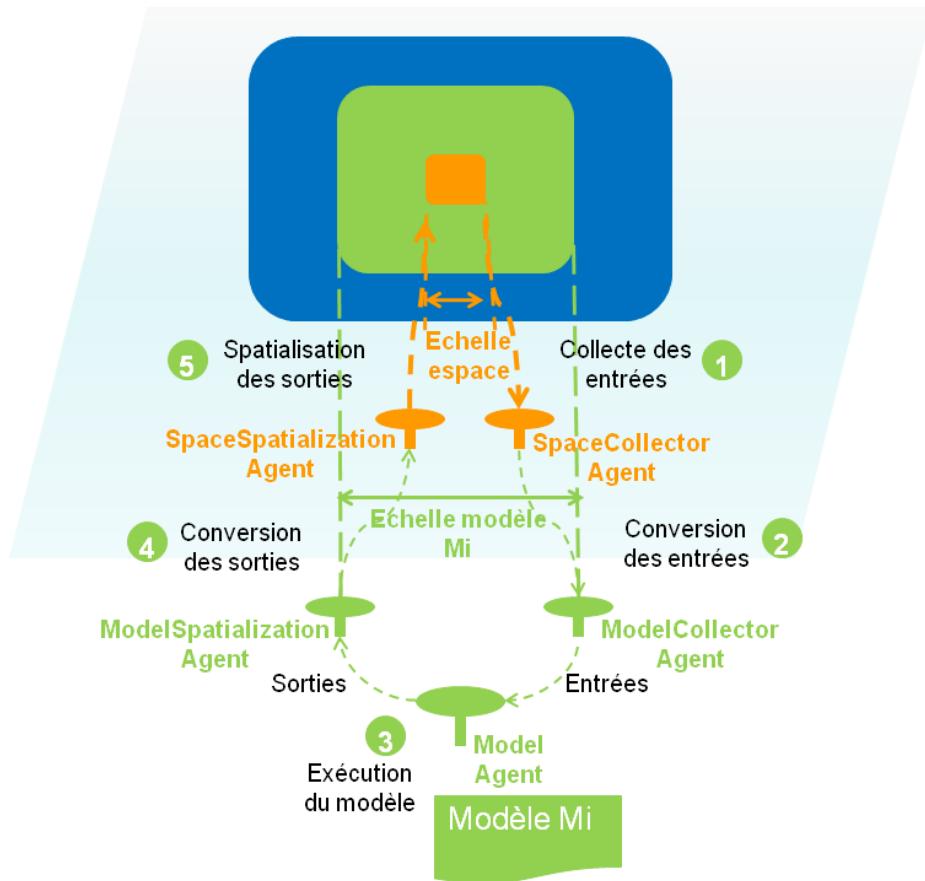


FIGURE 5.3 – Gestion de l'hétérogénéité spatiale des modèles à coupler

Gestion de l'hétérogénéité spatiale dans l'exemple fil rouge

Dans notre exemple fil rouge, le système multi-agents mis en place permettra de simuler les interactions entre les modèles via l'espace à plusieurs échelles : parcellaires, cellulaires, etc. Dans la figure (Fig. 5.4) on observe nettement la problématique de l'hétérogénéité des échelles spatiales étant donné que le modèle météorologique produit de l'eau Q_{H2O} à l'échelle de tout l'espace de la ville tandis que le modèle de croissance des plantes permet de calculer la quantité de biomasse Q_{Biom} produite à l'échelle de la parcelle (parcelles de l'espace vert de la carte vectorielle) où chaque parcelle abrite une culture différente ayant des caractéristiques d'absorption de l'eau

différentes. D'un autre côté l'espace dispose d'une représentation matricielle (raster) et agit à l'échelle de la cellule.

Le modèle de croissance des plantes dispose d'un agent modèle *Plant Model Agent*, d'un agent collecteur *Parcel Collector Agent*, et d'un agent de spatialisation *Parcel Spatialization Agent* à l'échelle de la parcelle. De l'autre côté le modèle de pluviométrie dispose d'un agent modèle *Pluv Model Agent*, d'un agent collecteur *Area Collector Agent*, et d'un agent de spatialisation *Area Spatialization Agent* à l'échelle de la zone d'étude.

Comme les données sont disponibles dans l'espace à l'échelle de la cellule les agents holoniques du modèle de croissance des plantes à savoir *Parcel Collector Agent* et *Parcel Spatialization Agent* vont se décomposer respectivement en agents *CellPlant Collector Agent*, et *CellPlant Spatialization Agent*. De même, les agents holoniques du modèle de pluviométrie vont se décomposer respectivement en agents *CellPluv Collector Agent*, et *CellPluv Spatialization Agent*. Ainsi, le processus de changement d'échelles spatiales se déroule comme suit :

- 1 - Comme l'agent collecteur du modèle ne dispose pas de la quantité Q_{H2O} à l'échelle demandée (parcelle), il va déléguer la collecte à l'agent de plus bas niveau *CellPlant Collector Agent* qui évolue à l'échelle de la cellule. De même pour le modèle de pluviométrie, l'agent collecteur *Area Collector Agent* va déléguer la tâche de la collecte de la quantité Q_{Biom} à son agent *CellPluv Collector Agent* à l'échelle de la cellule ;
- 2 - Comme le modèle de croissance des plantes travaille à l'échelle de la parcelle, l'agent *Parcel Collector Agent* va se charger de la conversion de la quantité d'eau (Q_{H2O} collectée à partir des cellules de l'espace par l'agent *CellPlant Collector Agent* à l'échelle du modèle (à savoir la parcelle). De même l'agent *Area Collector Agent* va se charger de la conversion de la quantité de biomasse (Q_{Biom} collectées à partir de l'espace) à l'échelle du modèle de pluviométrie ;
- 3 - Une fois que l'agent modèle *Plant Model Agent* dispose de la quantité Q_{H2O} à son échelle, il entame l'exécution de son modèle pour calculer la quantité de biomasse produite. De même l'agent modèle *Pluv Model Agent* va calculer la quantité d'eau produite Q_{H2O} en fonction de la quantité de biomasse collectée à partir de l'espace ;
- 4 - Par la suite l'agent *Parcel Spatialization Agent* se charge de la conversion de la quantité de Q_{Biom} à l'échelle de l'espace avant de les envoyer à son agent collecteur à l'échelle de l'espace *CellPlant Spatialization Agent*. De même l'agent *Area Spatialization Agent* assurera la conversion de la quantité de Q_{H2O} produite avant de l'envoyer à son agent *CellPluv Spatialization Agent* ;
- 5 - Une fois que l'agent *CellPlant Spatialization Agent* du modèle de croissance des plantes dispose de la quantité Q_{Biom} , il se charge de l'écriture de ces données au niveau de l'espace. De même dès que l'agent *CellPluv Spatialization Agent* du modèle de pluviométrie dispose de la quantité de Q_{H2O} à son échelle, il se charge de son écriture au niveau de l'espace.

En plus de la gestion des échelles spatiales, il est important de prendre en considération la différence des échelles temporelles des modèles à coupler lors de la modélisation des systèmes complexes spatiaux. Cette contrainte fera l'objet de la prochaine section.

5.3.2 Les temporalités des modèles à coupler

Dans ses travaux Denise Pumain [PPK06] définit la temporalité comme étant une durée spécifique associée à un processus donné. Par conséquent, lors de la spécification des échelles temporelles des modèles élémentaires à coupler, cette temporalité peut être exprimée de manière

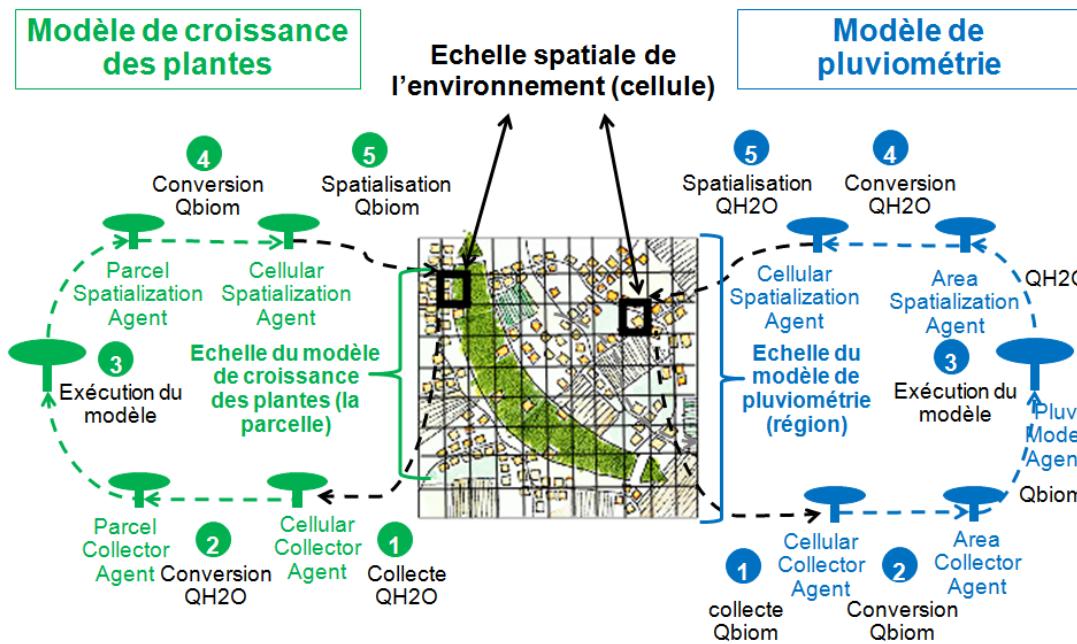


FIGURE 5.4 – Gestion de la différence des échelles spatiales du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes

continuée ou discrète selon la nature du phénomène représenté. Cette multitude de temporalités est due à la multitude des processus impliqués dans le fonctionnement d'un système spatial complexe.

Ainsi dans la modélisation des systèmes complexes spatiaux, si l'on considère comme étant totalement indépendants les modèles de départ que l'on choisit de coupler, il est souvent nécessaire de faire coexister différents pas de temps avec des événements discrets ou de changer dynamiquement au cours de la simulation le pas de temps des différents processus du phénomène étudié.

Étant donné que les modèles évoluent dans un espace commun, ils doivent être soumis à une même loi temporelle afin de respecter le principe de causalité [FTP98]. Pour gérer les problèmes relatifs à la différence des échelles temporelles, nous avons opté pour la technique de l'ordonnancement des dates d'exécution dans une liste ordonnée (ou chronogramme). L'idée de l'ordonnancement de l'exécution des modèles couplés s'inspire des méthodes d'ordonnancement des événements survenant dans un système distribué étant donné qu'un système modélisé par un ensemble de modèles couplés peut être assimilé à un système distribué sur des stations différentes.

Parmi les méthodes d'ordonnancement qui nous aurait servi d'exemple on pourrait citer la méthode de Lamport [Lam78] basée sur la règle de causalité qui stipule que le futur du monde simulé ne peut pas avoir influencé le passé. L'ordre de passage des modèles dans la liste ordonnée se fera selon l'ordre croissant des dates d'exécution des modèles. Ainsi comme les dates sont triées, la plus petite date passera toujours en premier à la tête de la liste. Par conséquent, le modèle qui se situe à la tête de la liste ordonnée recevra une autorisation d'exécution. Une fois que l'autorisation est acheminée à l'agent temps approprié la date relative au modèle sera supprimée de la liste ordonnée.

Par ailleurs, nous avons choisi une simulation par événements où chaque événement correspond à une date d'exécution d'un modèle dans la liste ordonnée de l'agent ordonnanceur. Une simulation par événements permet de mieux modéliser une société de modèles à différentes temporalités car les autorisations d'exécution des modèles peuvent être considérées comme une liste de tâches à accomplir [Sil10]. Ainsi à chaque événement, une autorisation d'exécution est envoyée au modèle correspondant à la première date dans la liste ordonnée.

Cependant, dans le cas où les modèles sont de même niveau d'échelle (même délai d'exécution), ou les dates d'exécution sont identiques, il est important de trouver un mécanisme qui permet d'éviter les situations de conflit. Par conséquent, en cas d'égalité entre les dates d'exécution ou les échelles des modèles, on définit une priorité propre à chaque modèle pour que le modèle le plus prioritaire passe en premier et gérer ainsi l'exécution des agents modèles .

Comme pour toutes les autres contraintes, le système multi-agents de couplage nous permet également de gérer la différence des échelles temporelles des modèles que l'on aura à coupler. Comme on peut l'observer dans la figure (Fig. 5.5), le modèle *Mi* dispose d'un agent modèle *Model Agent*, d'un agent temps *Time Agent* et d'un agent *Scheduler Agent*. Ainsi, le processus de changement d'échelles temporelles se déroule comme suit :

- 1 - L'agent temps *Time Agent* sera dédié à la gestion du temps du modèle *Mi* pour récupérer l'échelle de temps ainsi que la dernière date d'exécution du modèle. En se basant sur ces informations, l'agent *Time Agent* va calculer la nouvelle date d'exécution du modèle ;
- 2 - L'agent *Scheduler Agent* va s'occuper de la synchronisation de l'exécution des différents modèles à coupler, en ordonnançant les dates d'exécution envoyées par les agents temps dans une liste ordonnée. Dans cette liste les dates d'exécution sont triées et enchainées par ordre croissant. Comme indiqué précédemment, quand l'agent scheduler reçoit une nouvelle date d'exécution, il demande la priorité du modèle pour savoir quel modèle exécuter en premier en cas d'égalité d'échelles ;
- 3 - Tout modèle qui passe à la tête de la liste ordonnée, reçoit une autorisation d'exécution qui lui permet de s'exécuter ;
- 4 - Ainsi dès que l'agent *Model Agent* dispose d'une autorisation d'exécution, il entame l'exécution de son modèle.

Implantée de cette manière la gestion du temps de simulation permet de prendre en compte des pas de temps ou des événements non prévus au départ d'une simulation. Dans ce qui suit, nous allons illustrer le déroulement de la gestion de la différence des échelles temporelles grâce à notre exemple fil rouge.

Gestion de l'hétérogénéité temporelle dans l'exemple fil rouge

Dans notre exemple fil rouge, la croissance des plantes dépendra de la fréquence de la pluviométrie. Comme indiqué précédemment la différence entre les échelles temporelles des deux modèles sera assurée par des agents qui vont calibrer la fréquence des événements pseudo-aléatoires (événements discrets) du modèle pluviométrique et le pas de temps journalier du modèle de croissance des plantes à l'échelle de temps de la simulation (Fig. 5.6). Ainsi, le processus de changement d'échelles temporelles des modèles de l'exemple fil rouge se déroule comme suit (Fig. 5.6) :

- 1 - L'agent temps du modèle de croissance des plantes *Plant Time Agent* récupère l'échelle temporelle du modèle (modèle à pas de temps) pour en déduire le délai d'exécution du modèle (égal à un jour). Cet agent va calculer la future date d'exécution en fonction de la

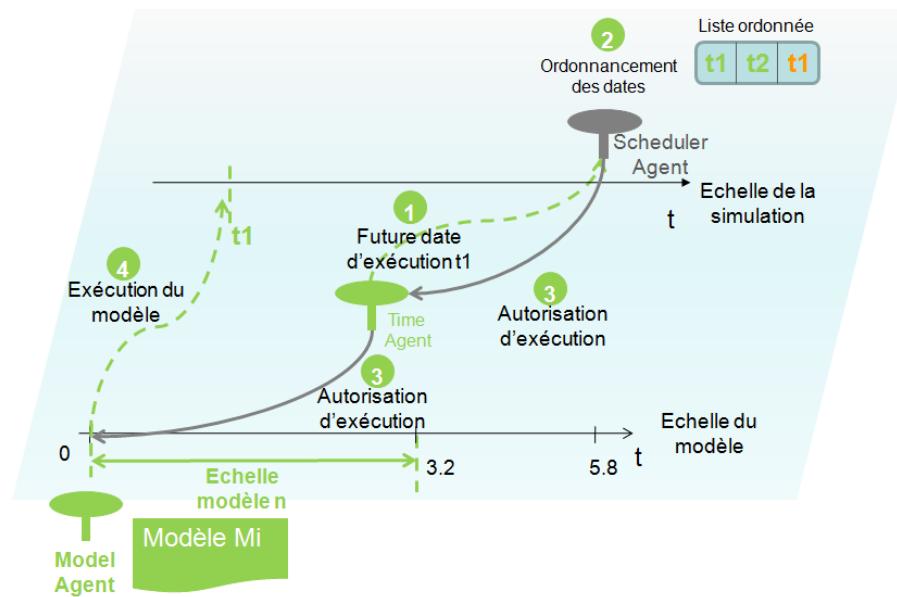


FIGURE 5.5 – Gestion de la différence des échelles temporelles lors du couplage

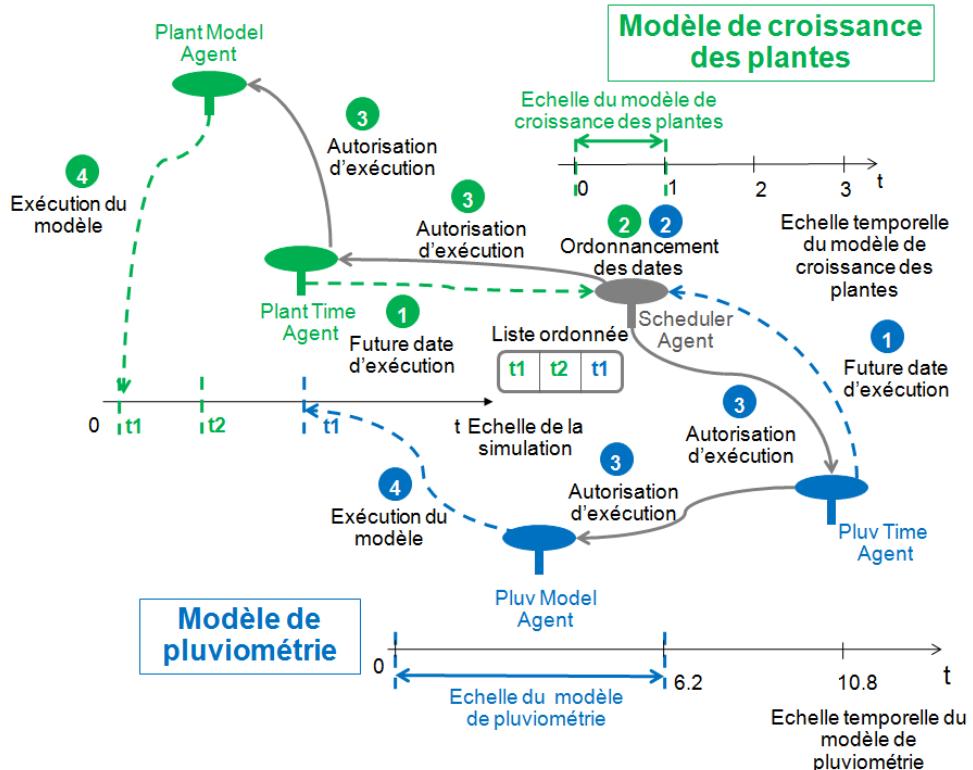


FIGURE 5.6 – Gestion de la différence des échelles temporelles du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes

dernière date d'exécution calculée et du délai récupéré. De même l'agent *Pluv Time Agent* va calculer la future date d'exécution en fonction de la dernière date d'exécution calculée et du délai calculé avec la loi de poisson du modèle de pluviométrie ;

- 2 - L'agent *Scheduler Agent* va s'occuper de la synchronisation de l'exécution des différents modèles à coupler, en ordonnant les dates d'exécution envoyées par les agents temps des deux modèles dans une liste ordonnée. Dans cette liste les dates seront triées par ordre croissant pour permettre au modèle ayant la plus petite date d'exécution de passer en premier. Comme indiqué précédemment, l'agent *Scheduler* reçoit avec chaque nouvelle date d'exécution, la priorité du modèle pour savoir quel modèle exécuter en premier en cas d'égalité des dates ;
- 3 - Le modèle qui passe à la tête de la liste, reçoit une autorisation d'exécution qui sera envoyée à son agent temps. Ce dernier va se charger de l'acheminer à l'agent modèle auquel il est associé ;
- 4 - Ainsi dès que l'agent modèle de croissance des plantes *Plant Model Agent* dispose d'une autorisation d'exécution, il entame l'exécution de son modèle. De même une fois que l'agent modèle de pluviométrie reçoit une autorisation d'exécution de la part de son agent temps *Pluv Time Agent*, il pourra commencer l'exécution.

Dans cette section nous avons spécifié une organisation (un ensemble d'agents, de rôles et de groupes...) située dans un espace partagé entre les modèles à coupler. Le groupe d'agents ainsi formé rassemble tous les éléments nécessaires au couplage du modèle. L'architecture présentée dans cette section sera formalisée davantage dans la section suivante afin de permettre aux agents de couplage d'interagir en respectant les contraintes de couplage précitées.

5.3.3 Le métamodèle de couplage

Nous allons nous concentrer dans cette section sur l'activité de modélisation proprement dite en commençant par la conception du métamodèle de couplage. Comme indiqué précédemment, l'approche de modélisation proposée dans la cadre de cette thèse se base sur la décomposition hiérarchique et organisationnelle d'un système complexe spatial donné.

L'objectif recherché est d'associer les avantages de ces deux approches à savoir la modularité des approches organisationnelles et la prédisposition des approches holoniques à modéliser des systèmes complexes hiérarchiques. Pour cela, notre métamodèle utilisera les concepts organisationnels de Rôle, Agent et Groupe combinés avec le concept de Holon. En effet, l'utilisation des holons permet de décomposer le système en niveaux hiérarchiques différents. L'approche organisationnelle AGRE [FB05], quant à elle, permet de spécifier l'organisation des agents holons.

En partant de ces principes nous proposons donc un métamodèle basé sur un système multi-agents holonique qui guide la conception d'une approche de couplage en définissant les environnements, les groupes, les rôles et les relations entre les agents responsables du couplage. Une fois le métamodèle structuré et ses dimensions définies, il est important de choisir un langage de conception qui permet de formaliser cette approche. Ceci a pour but de la rendre accessible à d'autres thématiciens ou concepteurs qui chercheront à l'implémenter dans une plateforme quelconque.

Comme on peut le constater plusieurs méthodes d'analyse et de conception des SMAs ont été proposées récemment pour la spécification des modèles d'organisation, d'interaction, etc. La plupart d'entre elles, s'appuient sur des techniques de modélisation empruntées à des méthodes

connues en développement orienté-objets. En ce qui nous concerne nous avons opté pour le langage de conception UML qui nous paraît le plus approprié pour la modélisation du métamodèle relatif à notre approche de couplage.

La spécification du métamodèle de couplage passe en premier lieu par la construction d'un diagramme de classes. Dans ce diagramme, les classes sont décomposées en trois blocs distincts pour faciliter la lecture du métamodèle, comme le montre la figure suivante (Fig. 5.7) :

- Bloc 1 : regroupe toutes les classes relatives aux modèles à coupler. On distingue la classe *Group* composée des classes *AgentRole*, *Agent* et *Space*. La classe *Agent* peut être spécialisée en *AtomicAgent* si l'agent n'est pas décomposable ou en *Holon* si l'agent est un super-holon décomposable en sous-holons pour atteindre de nouveaux niveaux d'abstraction. La classe *AgentRole* constitue une généralisation de tous les rôles que peuvent jouer les agents à savoir *ModelAgent*, *CollectorAgent*, *SpatializationAgent*, *TimeAgent* conformément à l'architecture proposée précédemment. Notons que la classe *ModelAgent* fait appel à la classe *KnowledgeBase* pour interpréter les entrées et les sorties non spatiales à partir de la base des connaissances commune à tous les modèles ;
- Bloc 2 : formé par les classes relatives à l'espace. Dans ce bloc la classe *Space* est divisée en zones *Area* elle-même décomposable en sous zones. Notons que dans notre métamodèle ces composantes de l'espace modélisé sont assimilées à des agents spatiaux à échelles spatiales différentes. Par ailleurs, les classes association *CollectedData* et *SpatializedData* permettent de stocker respectivement les données à collecter ou à spatialiser dans l'espace ;
- Bloc 3 : contient les classes relatives à la temporalité des modèles à coupler. Ainsi la classe *ModelTimeScale*, qui est l'échelle du modèle, peut être spécialisée en *TimeStepBasedScale* si l'échelle est au pas de temps du modèle et en *EventBasedScale* si l'échelle du modèle est évènementielle. La classe *SimulationSchedulerAgent* s'occupe de l'ordonnancement des dates dans le calendrier(liste ordonnée) commun à tous les modèles.

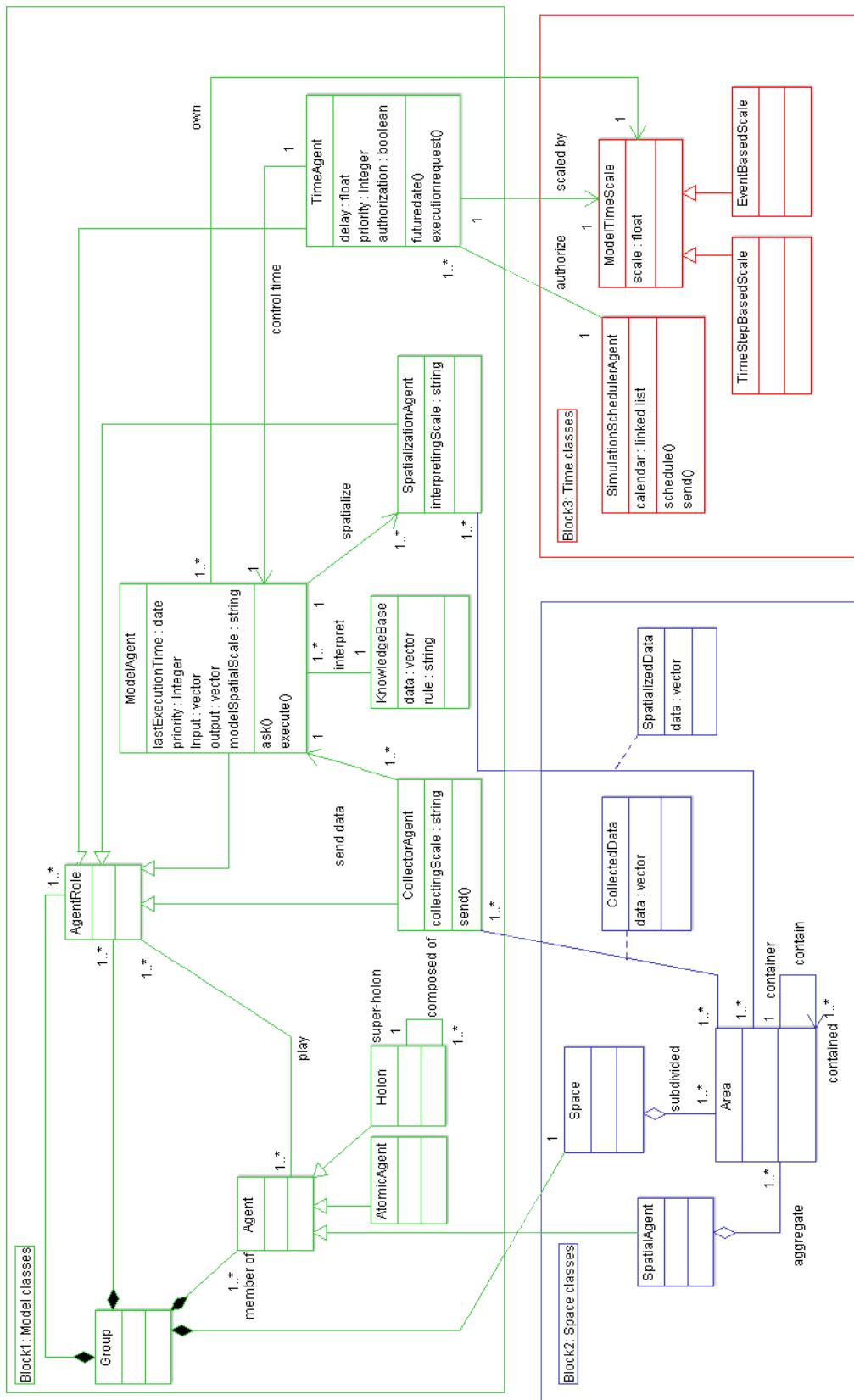


FIGURE 5.7 – Diagramme de classes du métamodèle de couplage

La structure du modèle de couplage de l'exemple fil rouge

On peut observer ces trois blocs dans l'instanciation de ce métamodèle pour l'élaboration du modèle de couplage formé du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes de notre exemple fil rouge. Le modèle UML de notre exemple fil rouge est donc composé des classes suivantes (Fig. 5.8) :

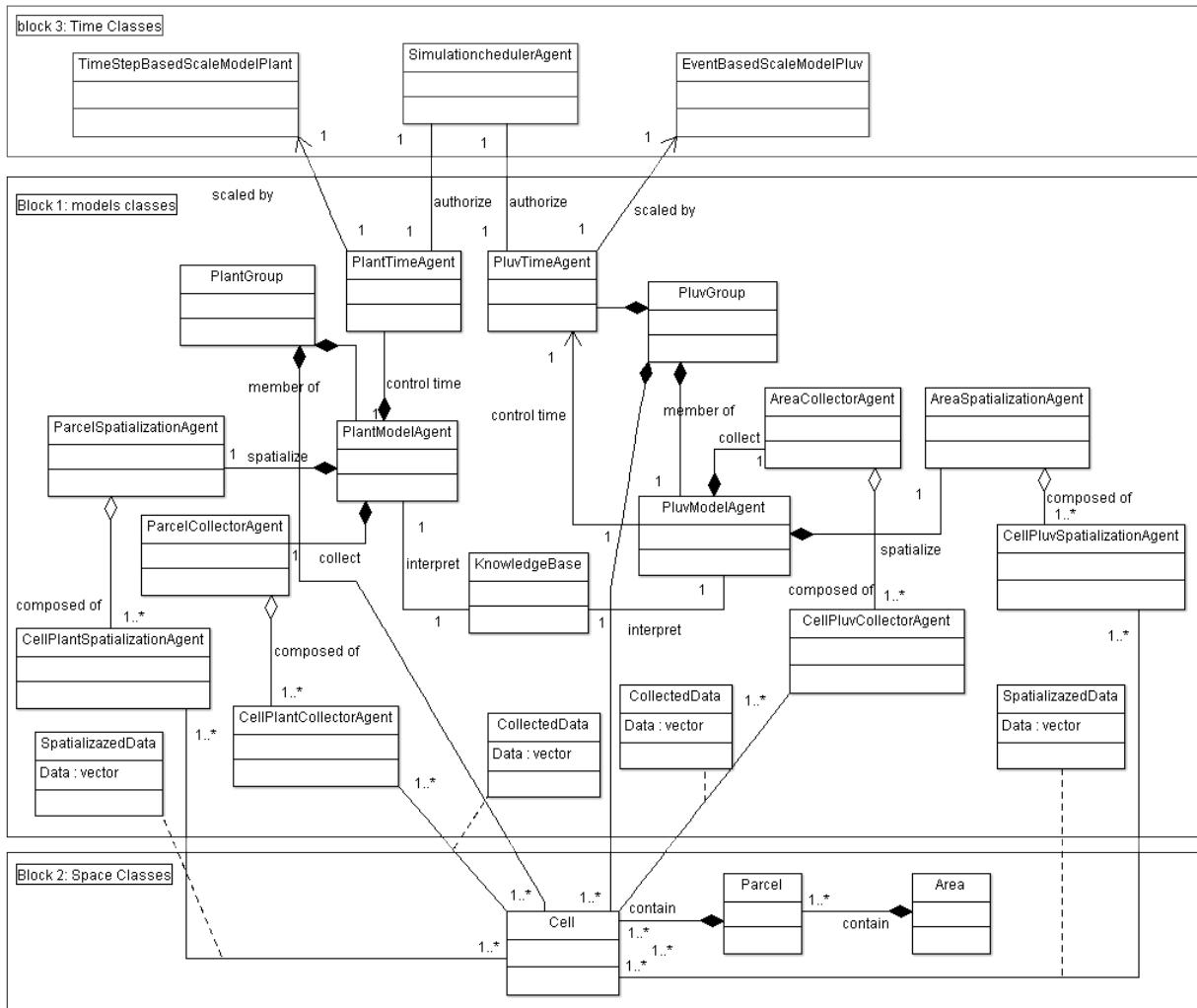


FIGURE 5.8 – Diagramme de classes de l'exemple fil rouge

- Le bloc 1 : contient les classes relatives aux deux modèles à coupler. Chaque modèle aura une classe groupe (`PlantGroup` et `PluvGroup`) qui sera composée comme indiqué dans le métamodèle (Fig. 5.7) par des classes rôles d'agents relatifs à la gestion du temps, de la collecte, de la spatialisation et de l'exécution du modèle (comme `ParcelSpatializationAgent` ou `PluvTimeAgent`, `PlantModelAgent`, etc). Certains de ces agents sont de type holons pour adapter l'échelle du modèle à l'échelle de l'espace (comme l'agent `Plant Spatialization Agent` décomposé en `CellPlant Spatialization Agent` ou l'agent `Area Collector Agent` décomposé

en *CellPluv Collector Agent*. Chaque groupe est composé également par la classe *Cell* qui constitue l'espace ;

- Le bloc 2 : contient les classes relatives à l'espace partagé par les deux modèles comme *Cell*, *Parcel* et *Area* correspondant respectivement à l'échelle de l'espace, du modèle de croissance des plantes et du modèle de pluviométrie ;
- Le bloc 3 : comprendra quant à lui, les classes relatives à la gestion de la différence des échelles temporelles des deux modèles (Fig. 5.8) à savoir la classe de l'ordonnanceur de la simulation *Simulation Scheduler Agent* et les classes des agents temps *Pluv Time Agent* et *Plant Time Agent* ainsi que les classes *StepBasedScale Model Plant EventBasedScale Model Pluv* correspondant respectivement à l'échelle à pas de temps discret du modèle de croissance des plantes et l'échelle à événements discrets du modèle de pluviométrie.

Dans cette section nous avons détaillé la conception du métamodèle qui va constituer la base de la méthodologie de couplage présentée dans la section suivante.

5.3.4 Du métamodèle à la méthodologie de couplage

Notre approche de couplage est formée d'un métamodèle et d'une méthodologie de couplage qui se complètent. Plus particulièrement, la méthodologie et le métamodèle sont interdépendants d'un point de vue fonctionnel. D'une part le système holonique tel qu'il est conçu par le métamodèle de couplage a besoin d'une méthodologie qui fournit des lignes méthodologiques pour l'analyse, la conception et l'implantation du modèle couplé [Gau07].

D'autre part, concevoir une méthodologie exige l'élaboration d'un métamodèle qui identifie les abstractions de base nécessaires à la modélisation du problème et de sa solution [Gau07]. C'est grâce à l'architecture organisationnelle hiérarchique de couplage proposée que le métamodèle assure la décomposition du système et sa modélisation à différents niveaux d'abstraction. L'identification des éléments du modèle couplé basé sur le métamodèle de couplage et son instantiation sont organisées selon les étapes fournies par la méthodologie de couplage qui spécifie les résultats de chaque phase du processus de couplage.

Généralement cette interdépendance est observée dans la plupart des méthodologies (qu'elles soient orientées agent ou non) qui débutent par la conception d'un métamodèle et finissent par la détermination d'un ensemble reproductible d'étapes à suivre pour concevoir le simulateur final. Ainsi, nous proposons donc dans ce qui suit une méthodologie qui s'inspire des principes de l'ingénierie logicielle pour assister le modélisateur à chaque stade du processus de couplage.

5.4 Une méthodologie de couplage de modèles

Les systèmes multi-agents demandent de longs efforts de développement. Il est donc souvent nécessaire de disposer d'un guide méthodologique pour assister le travail du modélisateur. Ainsi après la conception du métamodèle, la formalisation de notre approche de couplage passe par la mise en place d'une méthodologie de couplage de modèles afin d'expliquer les étapes que le modélisateur aura à suivre depuis l'analyse, à la conception et jusqu'à l'implémentation du modèle. Pour cela, nous allons nous baser sur le métamodèle SPEM [SPE07] fourni par l'OMG (Object Management Group) pour nous guider dans la spécification des étapes de notre démarche.

Comme le montre la figure (Fig. 5.9) le métamodèle SPEM considère le processus de développement comme une collaboration entre des entités abstraites actives (Rôles) qui effectuent des opérations (Activités), sur des entités concrètes et tangibles (Produits). Ce métamodèle a déjà été utilisé pour la modélisation de systèmes complexes dans la méthodologie ASPECS [Gau07].

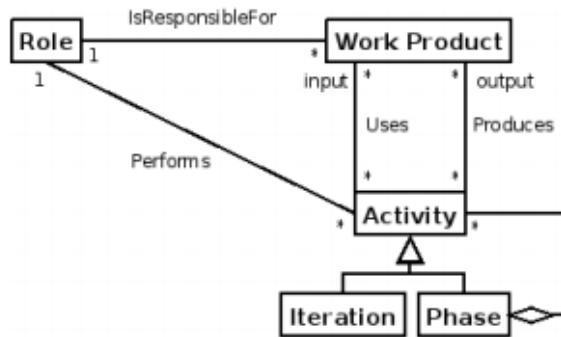


FIGURE 5.9 – Extrait du métamodèle SPEM source : [Gau07]

Dans ce qui suit, nous allons présenter les étapes de notre démarche de couplage à savoir : analyse des modèles, construction de la base de connaissances (Knowledge Base), corrélation des modèles, conception du modèle de couplage, implantation du simulateur (Fig. 5.10).



FIGURE 5.10 – Phases de la démarche de couplage

Notons qu'à chaque étape du processus de modélisation, il est nécessaire de répondre à un certain nombre de questions afin de rendre intelligible l'étude en elle-même et afin de rendre reproductibles les résultats de simulation.

5.4.1 Analyse des modèles et de l'espace

Cette phase vient tout juste après la sélection des modèles à coupler pour représenter le système complexe spatial étudié. L'analyse des modèles et de l'espace vise à fournir une description détaillée des modèles choisis et de l'espace qu'ils vont partager pour modéliser le système complexe spatial. L'ensemble des activités qui compose cette phase (à savoir l'analyse du modèle, analyse de l'espace et la comparaison des échelles des données avec l'échelle de l'espace) ainsi que les principaux entrées et produits sont décrits dans la figure (Fig. 5.11).

Analyse du modèle

Nous considérons qu'un modèle possède un ensemble de paramètres d'entrée et de sortie. Ainsi à chaque nouvelle exécution du modèle, il sera nécessaire de donner un ensemble de paramètres au modèle et d'en tirer un ensemble de données. En plus de l'identification des entrées et des sorties, il est essentiel d'identifier les échelles spatiales et temporelles des modèles. Ainsi chaque modèle disposera d'une fiche descriptive permettant d'identifier ses entrées, ses sorties et ses échelles spatio-temporelles (Fig. 5.11).

Analyse de l'espace

Dans cette phase nous considérons également qu'il est essentiel d'identifier les différentes composantes de l'espace ainsi que leurs différentes échelles. Ce travail sera formalisé dans un modèle d'analyse structurelle de l'espace (Fig. 5.11).

Comparaison des échelles des données avec l'échelle de l'espace

Le but de cette activité est de comparer les échelles des modèles avec les échelles des données stockées dans l'espace pour savoir s'il existe des différences d'échelles ou pas. Le résultat de ce travail sera formalisé dans une fiche comparative des modèles avec l'espace (Fig. 5.11). Il s'agit donc, dans cette phase, de distinguer les entrées et les sorties des modèles afin de pouvoir les lier à l'espace considéré. Quand les fiches descriptives des modèles identifient des entrées ou des sorties non spatiales, il est nécessaire de les traduire spatialement et ce grâce à la base de connaissances qui sera présentée dans la section suivante.

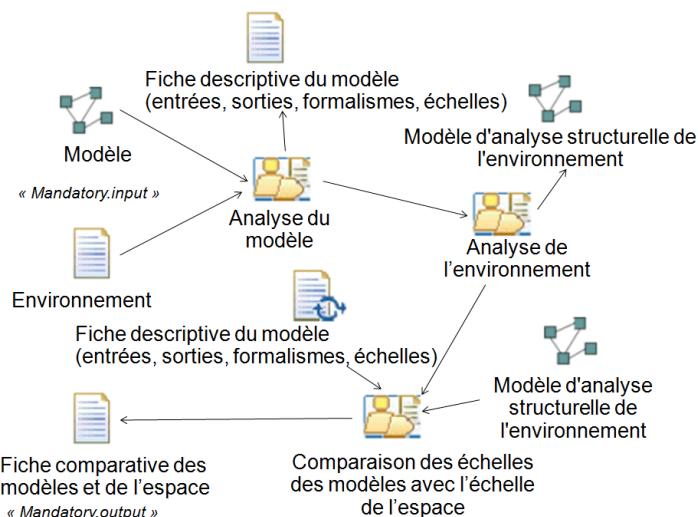


FIGURE 5.11 – Les étapes et les produits de la phase d'analyse des modèles et de l'espace

5.4.2 Construction de la base de connaissances spatiales

La construction des bases de connaissances (appelées communément "Knowledge base") permet de regrouper des connaissances spécifiques à un domaine donné. Plus particulièrement, dans notre cas elle va permettre de spécifier l'équivalence des données manipulées par les modèles en unités spatiales comme le montre la figure (Fig. 5.12).

Interprétation spatiale des données

Pour construire cette base il faudra définir des règles d'interprétation qui permettent d'interpréter les données à caractère non spatial (Fig. 5.12).

Création des données spatiales

Chaque opération d'interprétation d'une donnée non spatiale donnera naissance à une nouvelle donnée spatiale conformément à une règle d'interprétation. Le tout constituera une ligne dans la base de connaissances du système complexe spatial (Fig. 5.12).

Construction de la base de connaissances

L'ensemble des lignes créées formera la base de connaissances relative au système. Cette base de connaissances permettra donc de traduire les données des modèles en des données spatiales faciles à collecter ou à intégrer dans l'espace par les agents du couplage (Fig. 5.12). Il s'agit donc dans cette phase de spécifier les liens entre les données non spatiales et leurs équivalents dans l'espace.

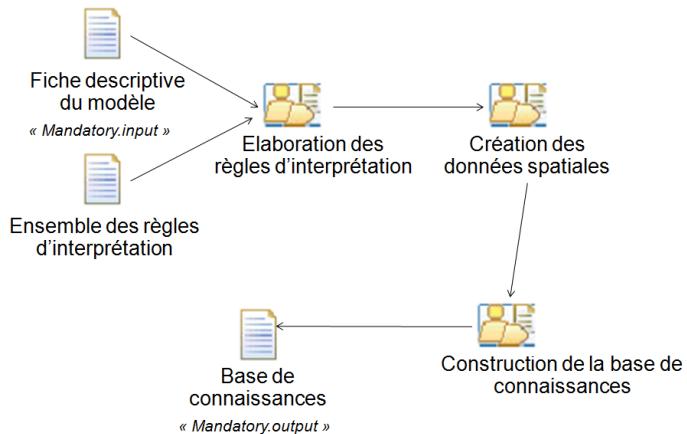


FIGURE 5.12 – Les étapes et les produits de la phase de construction de la base de connaissances spatiales

Une fois les données spatiales définies, il sera nécessaire de les lier via l'espace grâce à un graphe de dépendance qui sera présenté dans la section suivante.

5.4.3 Corrélation des modèles via l'espace

Lors de l'opération du couplage, la réutilisation des modèles nécessite souvent de prévoir la corrélation des modèles via l'espace. Il s'agit dans cette phase de lier des modèles qui ne sont pas forcément conçus pour être couplés ensemble en utilisant l'espace comme facteur de couplage. Pour cela il va falloir construire un graphe de dépendance défini dans les travaux de [Sie11] par "*l'ensemble des relations qui lient les différents modèles*". Ainsi à partir des modèles spécifiés dans la phase précédente, le graphe de dépendance peut aisément être construit en trois étapes (identification des entrées, relations entre les modèles, construction du graphe de dépendance) comme le montre la figure (Fig. 5.13).

Identification des entrées et des sorties

En effet ce graphe sera formé par les entrées et les sorties précédemment spécifiées dans les fiches descriptives des modèles (Fig. 5.13). En effet, dans le graphe de dépendances on trouve quelles sont les entrées à récupérer de l'espace et quelles sont les sorties à spatialiser suite à l'exécution du modèle. Notons qu'étant donné qu'on s'intéresse à la modélisation spatiale, le graphe de dépendance ne s'intéresse qu'aux entrées et sorties à caractère spatial.

Relations entre les modèles

Il va falloir relier les entrées et les sorties des modèles afin de pouvoir construire les relations entre les données. Dans ces liaisons le sens des flèches dépendra du sens des échanges entre les modèles (Fig. 5.13). En effet, dans le graphe de dépendances, le sens de la flèche va du modèle qui produit la donnée vers l'espace ou de l'espace vers le modèle qui reçoit la donnée. Aucun

lien direct entre les modèles ne peut être défini indépendamment de l'espace.

Construction du graphe de dépendance

L'ensemble des entrées, sorties et relations entre modèle formera le graphe de dépendance entre les modèles à coupler (Fig. 5.13). Ainsi pour pouvoir exécuter son modèle, l'agent de couplage doit prendre en compte à la fois ses propres paramètres et l'ensemble des données produites par l'exécution des autres modèles et partagées dans l'espace. Notons que l'ajout et la suppression de modèles pourrait engendrer des modifications au niveau du graphe de dépendance.

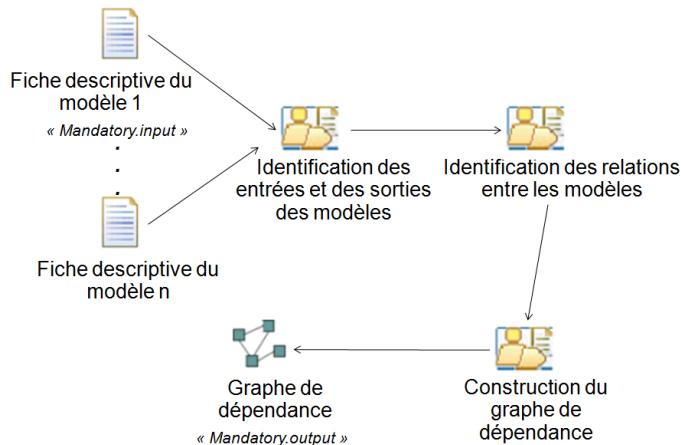


FIGURE 5.13 – Les étapes et les produits de la phase de corrélation des modèles

Une fois que les modèles sont identifiés et corrélatés on entame dans la phase suivante la conception du modèle de couplage.

5.4.4 Conception du modèle couplé

La phase de conception a pour but de construire le modèle couplé du système complexe spatial. Ce dernier sera basé sur un système multi-agents dont le comportement global doit être en mesure de fournir une solution à la problématique du couplage hétérogène et multi-échelles. Cette phase de conception est essentiellement basée sur les concepts du métamodèle de couplage associé à cette approche de couplage qui a été présenté en détail dans les sections précédentes. Cette phase comprend donc un ensemble d'activités qu'on présentera dans ce qui suit.

Identification des agents de couplage

Les connaissances identifiées dans les phases précédentes seront toutes utilisées pour l'identification des échelles et du nombre d'agents nécessaires au couplage (Fig. 5.14).

Organisation des agents

Il s'agit de spécifier la hiérarchie organisationnelle qui compose le modèle de couplage (Fig. 5.14). À chaque niveau de cette holarchie obtenue, les organisations ainsi que les rôles et les interactions qui la composent sont décrites. Plus particulièrement la spécification du comportement des rôles sera effectuée dans des diagrammes d'activités (Fig. 5.14).

Description des scénarios

Le modèle de la société d'agents est décrit également en termes de communication. Ainsi une description des scénarios d'exécution du modèle de couplage permettra de raffiner les interactions

pour décrire précisément leur contenu et leur protocole dans des diagrammes de séquence (Fig. 5.14). L'ensemble des activités et des produits associés qui composent cette phase permettront de définir l'architecture de couplage. Cette architecture sera décrite et spécifiée dans un diagramme de classe (Fig. 5.14). Les agents ainsi spécifiés seront implémentés pour intégrer les éléments spécifiques à la solution proposée.

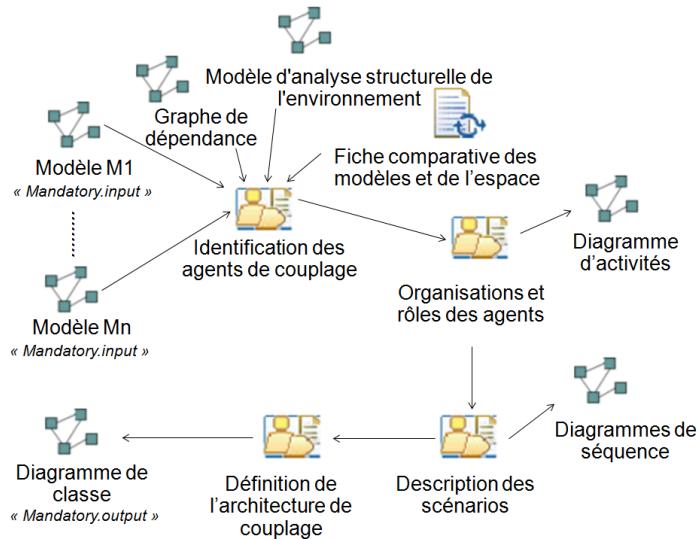


FIGURE 5.14 – Les étapes et les produits de la phase de conception du métamodèle de couplage

Une fois la conception du modèle couplé est établie, il s'agit dans l'étape suivante d'adapter ces modèles à l'approche agent afin de pouvoir les coupler.

5.4.5 Encapsulation des modèles

L'hypothèse de départ de notre démarche de couplage est de dire que pour faire communiquer des modèles hétérogènes, il faut qu'ils parlent la même langue. Il s'agit dans cette étape de réécrire les modèles afin de pouvoir les encapsuler par des agents.

Réécriture du modèle dans un langage agent

Chacun des modèles à coupler peut se baser dans son format d'origine sur des équations différentielles, des automates cellulaires, etc. La première étape de cette phase consiste donc à réécrire le modèle dans un langage agent pour permettre son exécution, l'intégration de ses entrées et la récupération de ses sorties. Le modèle d'origine ainsi réécri deviendra un modèle formalisé, le modèle d'origine qui a subi une intervention humaine c'est à dire adapter au formalisme agent. Son exécution doit aboutir à l'accomplissement d'actions sur l'espace. Il constituera le modèle de comportement de l'agent chargé d'assurer son couplage (Fig. 5.15).

Encapsulation du modèle par un agent

Pour pouvoir être couplé, un modèle atomique doit être encapsulé par un agent qui sera responsable de sa dynamique interne, de ses ports d'entrée et de sortie (Fig. 5.15). Le comportement de l'agent sera donc défini par le modèle qu'il va encapsuler. Ainsi l'introduction de la notion d'encapsulation de chaque modèle formalisé dans un seul agent permet de manipuler une seule interface qui va constituer le seul point de connexion avec le modèle à coupler. A ce

niveau, il devient possible d'implémenter ces modèles sur une plateforme de simulation orientée agent pour observer les résultats du couplage.

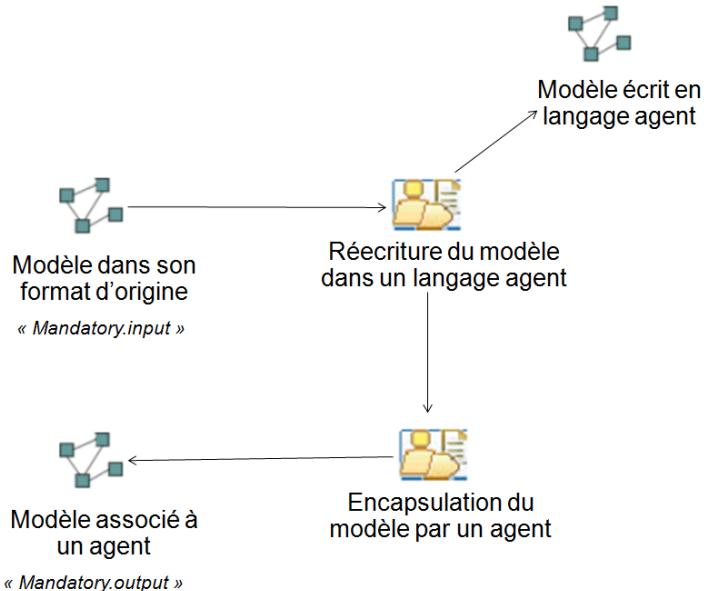


FIGURE 5.15 – Les étapes et les produits de la phase d'encapsulation des modèles

5.4.6 Implantation des agents en charge du couplage

Cette phase permet de fournir un modèle d'implantation de la solution multi-agents conçue durant la phase précédente. Il s'agit dans cette phase d'implémenter l'architecture des agents de couplage et fournir leur code source.

Élaboration des algorithmes

L'écriture des algorithmes constitue une transition des modèles de conception vers le code source des agents. Il s'agit ici d'écrire le comportement, les actions et les échanges de l'agent dans un langage algorithmique proche du langage machine (Fig. 5.16).

Production du code des organisations

La production du code source est étroitement liée au choix de la plateforme. L'ensemble des actions et des paramètres défini dans les algorithmes sera transformé en des tâches et des propriétés associées aux agents. Le résultat de cette activité sera le code source des agents de couplage qui devra être implémenté dans une plateforme de simulation (Fig. 5.16).

Élaboration des scénarios de tests

Il est important à la fin de cette phase de pouvoir valider le modèle conçu et implémenté dans les phases précédentes. Cette validation passe par un ensemble de scénarios de tests (jeux de tests) dont les résultats permettront de valider ou de réajuster le modèle en fonction des attentes du modélisateur (Fig. 5.16). Les activités et les principaux produits fournis dans cette phase d'implantation sont décrits dans la figure (Fig. 5.16).

Pour illustrer le déroulement de la méthodologie, on se propose de l'appliquer sur l'exemple fil rouge afin d'observer quelques produits de chaque phase.

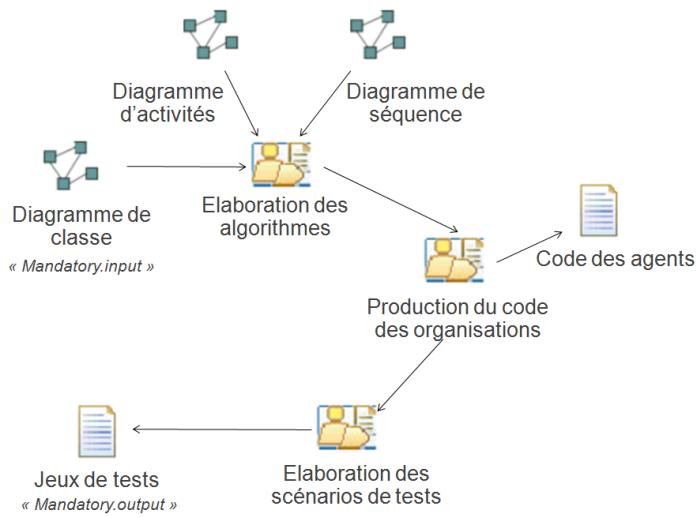


FIGURE 5.16 – Les étapes et les produits de la phase d'implantation des agents en charge du couplage

5.4.7 La démarche de couplage appliquée à l'exemple fil rouge

La figure (Fig. 5.17) présente certains des produits obtenus suite à l'application de notre démarche de couplage sur l'exemple fil rouge. Parmi ces produits, nous pouvons citer (a) modèle d'analyse structurelle de l'environnement, (b) fiche comparative des modèles et de l'espace (c) base des connaissances (d) graphe de dépendance (e) diagramme de classe (f) algorithme d'un agent d'exécution. Notre approche de couplage offre un mélange de solutions conceptuelles à intégrer selon les différentes étapes explicitées par la démarche de couplage tout en tenant compte des spécificités des systèmes complexes spatiaux. Dans la section suivante nous allons montrer dans quelle mesure l'ensemble des choix spécifiés dans notre approche de couplage va permettre de satisfaire aux contraintes précédemment identifiées.

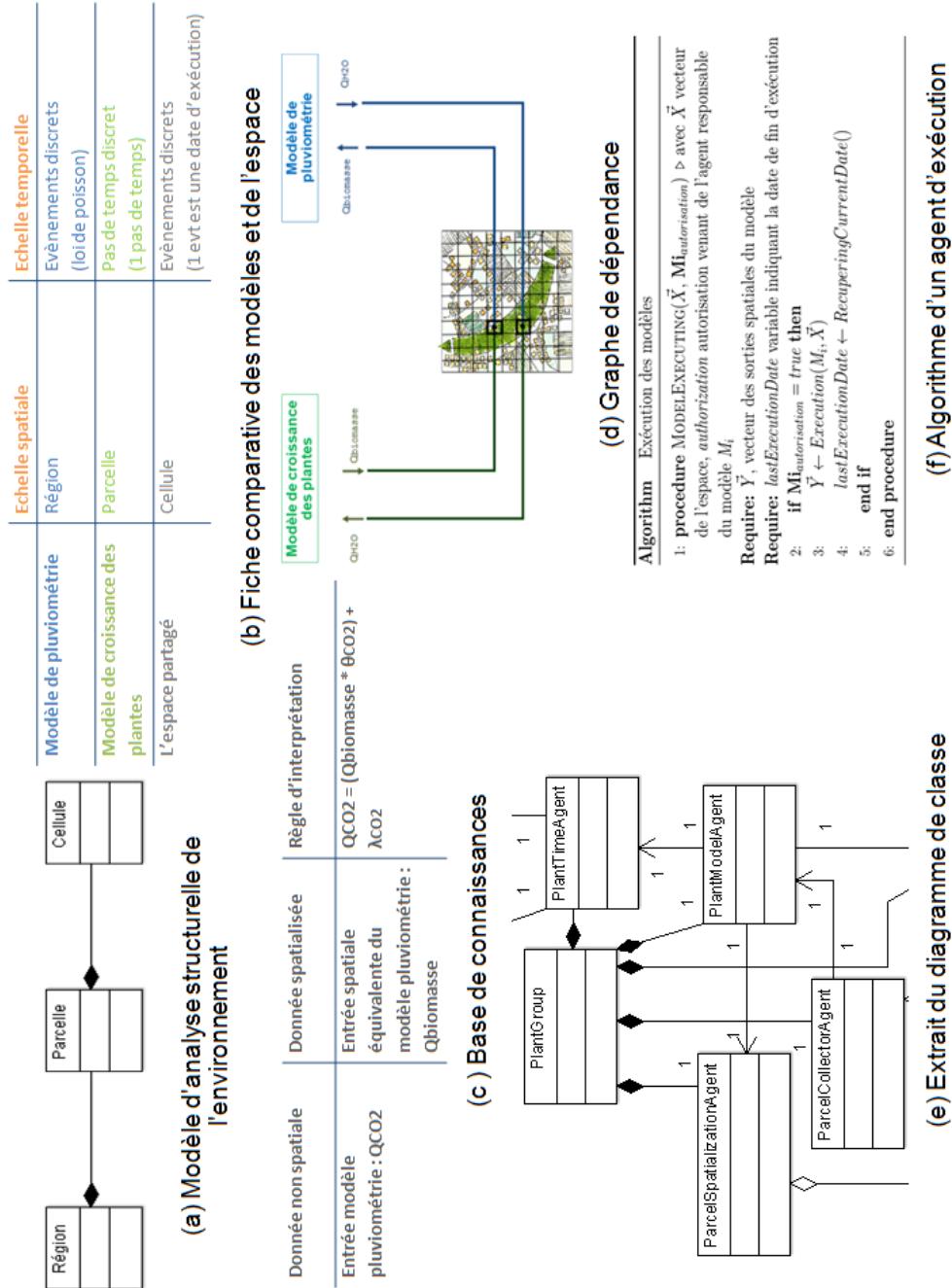


FIGURE 5.17 – Quelques exemples de produits obtenus suite à l'application de l'approche Coupling4modeling sur l'exemple fil rouge

5.5 Synthèse et analyse de l'approche adoptée

Le but de ce chapitre est d'apporter des réponses aux problèmes de formalisation de la démarche de couplage de modèles hétérogènes. Cette démarche se base sur un métamodèle organisationnel et holonique pour l'analyse et la conception de systèmes complexes spatiaux. Notre travail se distingue de la plupart des travaux qui ont traité la problématique de couplage, par une approche de couplage qui utilise l'espace et le paradigme agent pour répondre aux différentes contraintes et spécificités des systèmes complexes spatiaux structuré grâce à une méthodologie de couplage de six phases.

Par ailleurs, la démarche de construction du métamodèle de couplage adoptée dans le cadre de cette thèse s'est faite en prenant en considération les contraintes relatives au processus de couplage présentées précédemment [Bon08] (à savoir la modularité, l'hétérogénéité, la réutilisation, l'interopérabilité et la gestion de la différence des échelles des modèles). Plusieurs réponses ont été apportées sur les niveaux conceptuel, syntaxique, sémantique et dynamique afin de simplifier le traitement des questions liées à la problématique de couplage.

Des solutions conceptuelles pour assurer la modularité des modèles

A ce niveau nous souhaitons pouvoir changer facilement de modèles pour assurer la propriété de la modularité lors du couplage. Dans notre approche de couplage, le système multi-agents holonique permet de faciliter l'ajout et la suppression des modèles de façon modulaire. Plus particulièrement, l'agent modèle (*Model Agent* Fig. 5.7) va constituer le seul point de connexion avec le modèle. Cet agent est capable d'exécuter n'importe quel modèle pourvu qu'il respecte le graphe de dépendance entre les modèles, défini au préalable par le modélisateur. Dans le cas où le nouveau modèle n'a pas les mêmes entrées et sorties que le modèle d'origine, il est nécessaire de refaire le graphe de dépendance. Ainsi les modèles sont vus comme des boîtes noires encapsulées par des agents ce qui assure plus de généricité à notre approche (Fig. 5.18).

Des solutions sémantiques pour assurer la réutilisation des modèles

Il est important que l'approche de couplage permette au modélisateur de définir la sémantique des entrées à récupérer de l'espace et des sorties à réintégrer dans l'espace lors de l'opération du couplage en explicitant les liens entre les modèles à coupler. Ceci va se traduire dans notre approche de couplage par l'encapsulation des modèles par un agent, ce qui facilite la réutilisation des modèles du système complexe. Encore une fois, c'est l'agent modèle (*Model Agent* Fig. 5.7) qui constitue l'entité responsable de la cohérence sémantique des modèles. En effet, à travers cet agent le modélisateur unifie la sémantique des entrées et des sorties des modèles. Par la suite, l'agent modèle est capable de reconnaître les entrées du modèle qui doivent être collectées à partir de l'espace et les sorties à partager avec les autres modèles (Fig. 5.18).

Des solutions syntaxiques pour gérer l'hétérogénéité des modèles

Pour maîtriser l'existence de représentations potentiellement hétérogènes proposées par différents modèles, notre approche de couplage permet de considérer tous les modèles à coupler selon un point de vue extérieur, avec un formalisme unique. Pour cela, tout modèle qu'on cherche à coupler est assimilé à un agent modèle (*Model Agent* Fig. 5.7) qui a pour rôle d'uniformiser la syntaxe des modèles en adaptant leur formalisme au nouveau formalisme du système 5.18). Par conséquent cet agent permet de définir une syntaxe commune aux modèles à coupler dont les formalismes d'origine étaient différents au départ 5.18).

Des solutions dynamiques pour gérer l'interopérabilité et la différence des échelles des modèles

A ce niveau l'exécution globale de la simulation doit tenir compte des différentes politiques des modèles à coupler tout en respectant la contrainte de causalité des modèles. Ainsi dans notre approche de couplage, nous proposons d'utiliser un agent temps (*Time Agent* dans la figure Fig. 5.7) pour récupérer et manipuler le temps d'exécution du modèle auquel il est associé. Un agent spécifique sera également utilisé pour coordonner l'ensemble des modèles à coupler. Cet agent ordonnanceur (*Scheduler Agent* dans la figure Fig. 5.7) permettra de gérer l'ordonnancement global des demandes d'exécution venant des différents modèles qui évoluent à des échelles temporelles différentes. Le but est que la simulation globale respecte la contrainte de causalité (Fig. 5.18). Par ailleurs, dans notre approche de couplage la gestion des échelles spatiales des modèles est assurée par des agents holons capables de se décomposer dynamiquement pour atteindre un niveau d'abstraction donné et gérer ainsi la différence des échelles spatiales des modèles (Fig. 5.18).

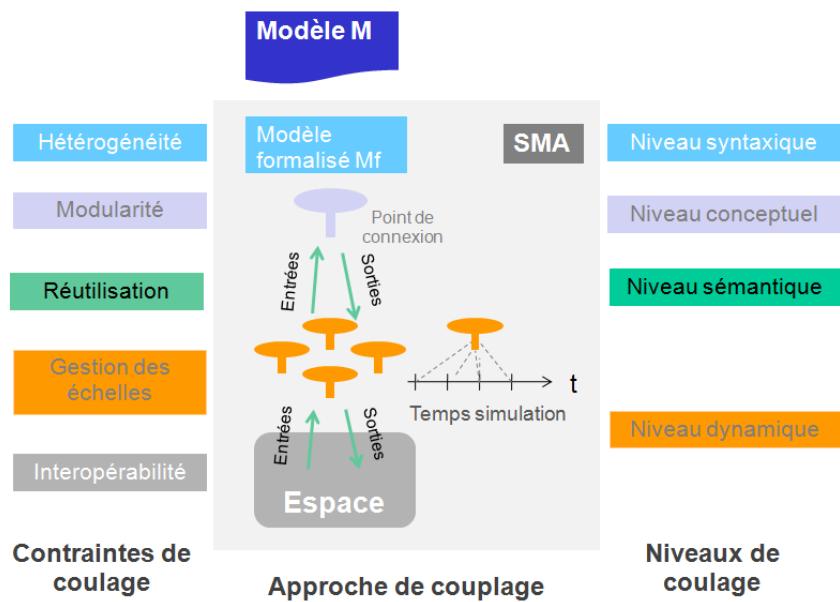


FIGURE 5.18 – Les solutions offertes par notre approche Coupling4modeling pour satisfaire les contraintes de couplage

Pour conclure, nous dirons que la structuration de notre métamodèle de couplage en différents niveaux (conceptuel, sémantique, syntaxique, dynamique) lors de sa construction, nous permet de satisfaire aux différentes contraintes de couplage définies précédemment à savoir la modularité, la réutilisation, l'hétérogénéité, l'interopérabilité et la gestion de la différence des échelles (cf. 3.3.3 page 54). Notons que nous avons délibérément choisi de ne pas aborder le niveau technique précédemment identifié dans (cf. 3.3.3 page 54). En effet, pour des contraintes de temps nous nous sommes limités au couplage de modèles non implémentés sur des simulateurs. Tous ces choix conceptuels seront explicités dans des algorithmes qui seront détaillés dans le prochain chapitre pour constituer la transition vers l'implémentation sur une plateforme de simulation.

Chapitre 6

De la problématique du couplage à la problématique algorithmique : application à l'exemple fil rouge

Sommaire

6.1	Introduction	123
6.2	Les algorithmes de gestion des échelles temporelles	124
6.2.1	L'algorithme principal de la gestion temporelle	124
6.2.2	Calcul de la future date d'exécution des modèles	127
6.2.3	Ordonnancement des dates d'exécution des modèles	129
6.3	Les algorithmes de gestion des échelles spatiales	131
6.3.1	L'algorithme principal de la gestion spatiale	131
6.3.2	Exécution des modèles	136
6.3.3	Collecte des données des modèles	139
6.3.4	Spatialisation des données des modèles	143
6.4	Synthèse et discussion	146

6.1 Introduction

En traitant les différentes problématiques rencontrées lors de la démarche de couplage de modèles, nous avons eu à structurer l'ensemble des questions abordées en plusieurs niveaux : utilisation de l'espace comme facteur de couplage, interopérabilité des modèles, gestion des échelles spatiales et temporelles, etc. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur le niveau dynamique du couplage. Nous abordons la question de la coordination entre modèles d'un point de vue algorithmique afin que ceux-ci puissent s'exécuter tout en échangeant des données à travers l'espace. Ce passage algorithmique constitue une transition du modèle de couplage conçu dans la phase de conception à l'implémentation de l'architecture de couplage dans la plateforme de couplage.

Nous proposons une version centralisée et une version distribuée des algorithmes de la gestion des échelles spatiales et temporelles. La version centralisée est destinée à la gestion de la

différence des échelles par une même entité chargée du couplage des modèles. La version distribuée permettra d'implémenter les algorithmes par des entités différentes qui peuvent être par exemple des agents. Les deux versions peuvent être utilisées selon les besoins des modélisateurs. Ainsi dans le cadre de notre problématique de couplage l'ensemble des algorithmes décentralisés que nous proposons correspondent aux comportements des entités (par exemple des agents de couplage) qui seront implémentées dans la plateforme de simulation. Nous pensons par ailleurs que certains des algorithmes proposés peuvent être réutilisés en dehors du couplage. Nous visons essentiellement les problématiques multi-échelles où il est nécessaire de gérer la différence des échelles spatiales et temporelles des dynamiques étudiées. L'exemple fil rouge présenté dans les chapitres précédents (cf. 4.5 page 91), nous permettra d'illustrer le fonctionnement des algorithmes distribués proposés pour la gestion de la différence des échelles spatiale et temporelle des modèles.

6.2 Les algorithmes de gestion des échelles temporelles

Dans cette section, nous expliquons ce qu'il faut faire pour résoudre la contrainte de la différence des échelles temporelles des modèles ou de dynamiques d'un même modèle (échelles à pas de temps, à évènements discrets, etc). Ainsi les algorithmes de la gestion des échelles temporelles ont pour objectif de calculer les dates d'exécution des modèles, de les ordonner sur l'échelle de temps de la simulation et de déclencher l'exécution du modèle au moment opportun. Par ailleurs, il est nécessaire de définir un planning d'exécution des tâches commun à tous les modèles (qu'on appellera calendrier) et d'un ordre de priorité pour chaque modèle qui sera utilisé en cas d'égalité d'échelles ou de simultanéité des dates d'exécution.

Comme indiqué précédemment, la gestion de la différence des échelles se fera dans ce chapitre à travers une version centralisée et une version distribuée des algorithmes selon les besoins du modélisateur. Ainsi, nous présentons deux types d'algorithmes : un algorithme centralisé pour la gestion de la différence des échelles temporelles (Algorithme 1) et deux algorithmes distribués pour le calcul de la date future du système (Algorithme 2) et d'ordonnancement des modèles (Algorithme 5). Ces deux types d'algorithmes seront lancés pour chaque modèle qu'on cherche à exécuter. Ils sont applicables aussi bien sur les modèles à pas de temps que les modèles à évènements discrets.

6.2.1 L'algorithme principal de la gestion temporelle

Cet algorithme (Algorithme 1) doit être exécuté pour chaque modèle ou dynamique à échelle temporelle différente. Avant d'élaborer cet algorithme on se propose de distinguer les étapes relatives à la gestion de la différence des échelles dans la figure (Fig. 6.1). L'ensemble de ces étapes sera formalisé par la suite dans l'algorithme de gestion des échelles temporelles (Algorithme 1). Chaque étape présentée dans cette figure sera formalisée dans une ou plusieurs lignes de l'algorithme (Algorithme 1).

Description de l'algorithme de gestion de la différence des échelles temporelles (Algorithme 1)

La procédure de gestion des échelles temporelles prend comme paramètres (M_i) l'identifiant du modèle ou de la dynamique à gérer ayant l'échelle temporelle $Mi_{temporalScale}$, la priorité $Mi_{priority}$ et l'autorisation d'exécution $Mi_{authorization}$, *calendar* une liste ordonnée qui va servir à l'ordonnancement des dates d'exécution des modèles. Notons que l'échelle temporelle du modèle

$Mi_{temporalScale}$ peut être soit une constante s'il s'agit d'un modèle à pas de temps ou le résultat d'une loi quelconque (loi de probabilité par exemple) s'il s'agit d'un modèle à événements discrets. La priorité $Mi_{priority}$ est un chiffre allant de 1 au nombre total des modèles à coupler où le modèle le plus prioritaire aura le plus petit chiffre qui correspond à la plus forte priorité. L'autorisation d'exécution $Mi_{authorization}$ est une variable booléenne qui contient la valeur True si le modèle est autorisé à s'exécuter ou la valeur False dans le cas échéant.

Par ailleurs, on considère τ_{Mi} la date de la prochaine exécution du modèle (M_i), $\tau_{-1}Mi$ la dernière date d'exécution du modèle (M_i), $delay$ le délai d'exécution correspondant à l'échelle temporelle du modèle (M_i). Cette procédure *Multiechelletemporelle* sera exécutée pour chaque modèle (M_i) des modèles ou des dynamiques multi-échelles. Tant que la future date d'exécution du modèle τ_{Mi} est supérieure à la date courante du système retornée par la fonction *CurrentTime()*, cela veut dire que le modèle ne s'est pas encore exécuté. Dans ce cas le programme doit se mettre en attente (grâce à la fonction *wait()*) jusqu'à l'exécution du modèle avant d'entamer à nouveau le calcul de la nouvelle date d'exécution. A partir du moment où le contenu de la variable τ_{Mi} devient inférieur ou égal à la date courante du système retornée par la fonction *CurrentTime()* on entame à nouveau le calcul de la future date d'exécution du modèle (M_i). La prochaine date d'exécution τ_{Mi} du modèle sera calculée en fonction de la dernière date d'exécution du modèle $\tau_{-1}Mi$ et du délai correspondant à l'échelle temporelle $delay$. Par la suite, on entame l'ordonnancement de chaque date d'exécution calculée.

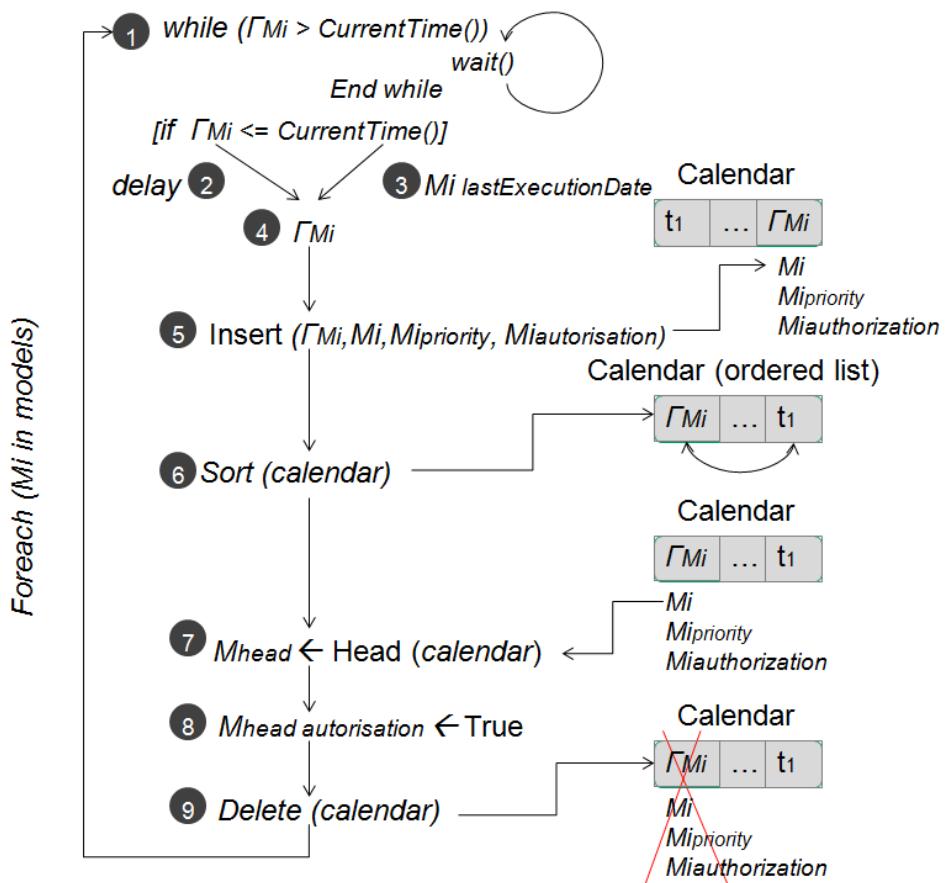


FIGURE 6.1 – Les étapes de l'algorithme principal pour la gestion de la différence des échelles temporelles

Algorithm 1 Algorithme de gestion de la différence des échelles temporelles

```

1: procedure MULTIECHELLETEMPORELLE( $M_i$ ,  $calendar$ )  $\triangleright$  avec ( $M_i$ ) identifiant du modèle
   ayant l'échelle temporelle  $Mi_{temporalScale}$ , la priorité  $Mi_{priority}$  et l'autorisation d'exécution
    $Mi_{authorization}$ ,  $calendar$  le calendrier commun à tous les modèles
Require:  $\tau_{Mi}$  la date de la prochaine exécution du modèle ( $M_i$ )
Require:  $\tau_{-1}Mi$  la dernière date d'exécution du modèle ( $M_i$ )
Require:  $delay$  le délai d'exécution correspondant à l'échelle temporelle du modèle ( $M_i$ )
2:   for each  $Mi$  in Models do
3:     while  $\tau_{Mi} > CurrentTime()$  do
4:        $wait()$ 
5:     end while
6:     if  $\tau_{Mi} \leq CurrentTime()$  then
7:        $\tau_{-1}Mi \leftarrow Mi_{lastExecutionDate}$ 
8:        $delay \leftarrow Mi_{temporalScale}$ 
9:        $\tau_{Mi} \leftarrow \tau_{-1}Mi + delay$ 
10:    end if
11:     $Insert(M_i, \tau_{Mi}, Mi_{priority}, Mi_{authorization})$ 
12:     $Sort(calendar)$ 
13:     $M_{head} \leftarrow Head(calendar)$ 
14:     $M_{head}_{authorization} \leftarrow True$ 
15:     $Delete(calendar)$ 
16:   end for
17: end procedure

```

Avec :

- $wait()$: une fonction qui permet au programme d'attendre jusqu'à ce que la condition spécifiée ne soit plus vérifiée ;
- $CurrentTime()$: une fonction qui retourne la date courante du système ;
- $Insert(param1, param2, param3, param4)$: une procédure qui permet d'insérer un élément composé de quatre champs dans la liste ordonnée ;
- $Head(list)$: une fonction qui retourne l'élément à la tête de la liste $list$;
- $Sort(list)$: une fonction qui permet de trier la liste $list$;
- $Delete(list)$: une procédure qui permet de supprimer l'élément à la tête de la liste $list$.

Cette date d'exécution τ_{Mi} , le modèle (M_i), sa priorité $Mi_{priority}$ et le contenu de l'autorisation $Mi_{authorization}$ seront insérées dans une même case à la fin de la liste ordonnée prévue pour l'ordonnancement des dates d'exécution des modèles. L'insertion de ces champs nous permet de connaître le modèle relatif à la date, sa priorité en cas d'égalité entre les dates d'exécution des modèles et de changer la valeur de son autorisation. Comme il s'agit d'une liste ordonnée, il est nécessaire de réordonner les dates d'exécution suite à chaque insertion par ordre croissant avec la fonction $Sort$. Par la suite, en utilisant la fonction $Head (calendar)$ on récupère l'élément à la tête de la liste ayant donc la plus petite date d'exécution. Nous cherchons à récupérer en particulier le modèle M_{head} à la tête de la liste. Le modèle à la tête de la liste M_{head} recevra une autorisation d'exécution. Ainsi $M_{head}_{authorization}$ recevra la valeur $True$. Une fois que le nom du modèle est récupéré et que l'autorisation est envoyée, le premier élément sera supprimé de la liste grâce à la fonction $Delete$.

Dans ce qui suit, nous proposons une version adaptée aux systèmes multi-agents dans laquelle l'algorithme principal de la gestion temporelle sera subdivisé en deux sous algorithmes afin de pouvoir le distribuer sur plusieurs entités. En effet, chaque algorithme sera exécuté par une entité temporelle particulière et sera détaillé dans les prochaines sections. On aura donc un algorithme de calcul de la date future du modèle (Algorithme 2), et un algorithme d'ordonnancement des modèles (Algorithme 5).

6.2.2 Calcul de la future date d'exécution des modèles

Nous présentons dans cette section, l'algorithme 2 qui permettra à l'entité temps *TimeEntity* de calculer la future date d'exécution du modèle qui lui est associé (M_i). La différence entre la version centralisée et la version distribuée se situe dans la division des tâches entre des entités différentes qui peuvent être des processus, des agents, etc. Ceci a pour avantage d'assurer plus de généricité à nos algorithmes qui peuvent être utilisés dans le cadre du couplage ou en dehors de cette problématique. Nous présentons donc dans cette section une version algorithmique pour la gestion des échelles temporelles adaptée à notre approche de couplage à base d'agents. Le premier algorithme de calcul de la future date d'exécution 2 se déroule comme suit :

Algorithm 2 L'algorithme de calcul de la future date d'exécution

```

1: function CALCULATINGFUTUREDATE( $()Mi$ )     $\triangleright$  avec  $Mi$  l'identifiant du modèle ayant la
   dernière date d'exécution  $Mi_{lastExecutionDate}$  et l'échelle temporelle  $Mi_{temporalScale}$ 
Require:  $delay$  le délai d'exécution du modèle ( $M_i$ )
Require:  $\tau_{Mi}$  une variable contenant la prochaine date d'exécution du modèle ( $M_i$ )
Require:  $\tau_{-1}Mi$  une variable permettant de récupérer la dernière date d'exécution du modèle
   ( $M_i$ )
2:   for each  $Mi$  in Models do
3:     while  $\tau_{Mi} > CurrentTime()$  do
4:       wait()
5:     end while
6:     if  $\tau_{-1}Mi \leq CurrentTime()$  then
7:        $\tau_{-1}Mi \leftarrow Mi_{lastExecutionDate}$ 
8:        $delay \leftarrow Mi_{temporalScale}$ 
9:        $\tau_{Mi} \leftarrow \tau_{-1}Mi + delay$ 
10:    end if
11:    return  $\tau_{Mi}$ 
12:   end for
13: end function

```

Le fonctionnement de ces algorithmes sera illustré par les deux modèles de l'exemple fil rouge. On présente donc dans ce qui suit, les algorithmes qui permettront respectivement de calculer la future date d'exécution du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes.

6.2.2.1 Application à l'exemple fil rouge : calcul de la future date d'exécution du modèle de pluviométrie

Nous présentons dans cette section l'algorithme de l'agent responsable du calcul de la future date d'exécution du modèle de pluviométrie. Comme dans la version distribuée, chaque algorithme est assuré par une entité indépendante il est nécessaire de prévoir des fonctions d'envoi

ou de réception des données pour assurer les échanges entre ces entités. On note en particulier des échanges entre l'agent responsable de l'exécution du modèle $ModAgent_{Mpluv}$, l'agent responsable du temps du modèle $TimeAgent_{Mpluv}$ et l'entité responsable de l'ordonnancement des dates d'exécution $SchedulerAgent$. Notons que pour les algorithmes relatifs aux modèles de l'exemple fil rouge nous allons utiliser des fonctions dédiées aux échanges des données entre les modèles :

- $DataReceiving(Entity, \alpha)$: une méthode qui permet de demander à l'entité $Entity$ une donnée α ;
- $DataSending(Entity, \alpha)$: une méthode qui permet d'envoyer à l'entité $Entity$ une donnée α ;
- $wait()$: une procédure qui permet à une entité donnée de se mettre en attente.

Le premier algorithme relatif au calcul de la future date d'exécution du modèle de pluviométrie (Algorithme 3) et sa description seront présentés dans ce qui suit.

Algorithm 3 Algorithme de l'agent temps du modèle de pluviométrie

```

1: while  $\tau_{Mpluv} > CurrentTime()$  do
2:    $ModAgent_{Mpluv}.wait()$ 
3: end while
4: if  $\tau_{-1}Mpluv \leq CurrentTime()$  then
5:    $\tau_{-1}Mpluv \leftarrow DataReceiving(ModAgent, Mpluv_{lastExecutionDate})$ 
6:    $\Delta \leftarrow Mpluv_{temporalScale}$ 
7:    $\tau_{Mpluv} \leftarrow \tau_{-1}Mpluv + \Delta$ 
8:    $DataSending(SchedulerAgent, M_{pluv}, \tau_{Mpluv}, M_{pluv}_{priority}, M_{pluv}_{authorization})$ 
9: end if

```

Description de l'algorithme de l'agent temps du modèle de pluviométrie (Algorithme 3)

La procédure de calcul de la future date d'exécution des modèles est assurée par l'agent $TimeAgent_{Mpluv}$. Tant que le modèle ne s'est pas encore exécuté, l'agent temps $TimeAgent_{Mpluv}$ reste en attente avant d'entamer à nouveau le calcul de la future date d'exécution du modèle. Dans ce cas le programme doit se mettre en attente (grâce à la fonction $wait()$) jusqu'à l'exécution du modèle avant d'entamer à nouveau le calcul de la nouvelle date d'exécution. Si le modèle s'est déjà exécuté, c'est à dire sa dernière date d'exécution $\tau_{-1}Mpluv$ est inférieure ou égale à la date courante on entame le calcul de la future date d'exécution du modèle (M_{pluv}).

On commence par demander à l'entité responsable de l'exécution du modèle $ModAgent_{Mpluv}$ la dernière date d'exécution du modèle $Mpluv_{lastExecutionDate}$. Cette date sera stockée dans $\tau_{-1}Mpluv$. La variable Δ permettra de récupérer l'échelle temporelle du modèle $Mpluv_{temporalScale}$ qui sera égal au résultat de la loi de poisson à paramètre λ définie pour le modèle. La future date d'exécution τ_{Mpluv} sera calculée en fonction de la dernière date d'exécution du modèle de pluviométrie $\tau_{-1}Mpluv$ et du délai d'exécution Δ . La nouvelle date d'exécution calculée τ_{Mpluv} , l'identifiant du modèle M_{pluv} , sa priorité $M_{pluv}_{priority}$ ainsi que le contenu son autorisation d'exécution $M_{pluv}_{authorization}$ seront envoyés à l'entité $SchedulerEntity$.

Ce même algorithme sera utilisé aussi pour le calcul de la future date d'exécution du modèle de croissance des plantes dont l'algorithme sera présenté dans la section suivante.

6.2.2.2 Application à l'exemple fil rouge : calcul de la future date d'exécution du modèle de croissance des plantes

L'agent temps responsable du calcul de la future date d'exécution du modèle de croissance des plantes $TimeAgent_{Mplant}$, suivra l'algorithme présenté dans cette section (Algorithme 4). Cet algorithme sera présenté et décrit dans ce qui suit.

Algorithm 4 Algorithme de l'agent temps du modèle de croissance des plantes

```

1: while  $\tau_{Mplant} > CurrentTime()$  do
2:    $ModAgent_{Mplant}.wait()$ 
3: end while
4: if  $\tau_{-1}Mplant \leq CurrentTime()$  then
5:    $\tau_{-1}Mplant \leftarrow DataReceiving(ModAgent, Mplant_{lastExecutionDate})$ 
6:    $\Delta \leftarrow Mplant_{temporalScale}$ 
7:    $\tau_{Mplant} \leftarrow \tau_{-1}Mplant + \Delta$ 
8:    $DataSending(SchedulerAgent, M_{plant}, \tau_{Mplant}, Mplant_{priority}, Mplant_{authorization})$ 
9: end if

```

Description de l'algorithme de l'agent temps du modèle de croissance des plantes (Algorithm 4)

La procédure de calcul de la future date d'exécution des modèles est assurée par l'agent $TimeAgent_{Mplant}$. Tant que le modèle ne s'est pas encore exécuté, l'agent temps $TimeAgent_{Mplant}$ reste en attente avant d'entamer à nouveau le calcul de la future date d'exécution du modèle. Dans ce cas le programme doit se mettre en attente (grâce à la fonction $wait()$) jusqu'à l'exécution du modèle avant d'entamer à nouveau le calcul de la nouvelle date d'exécution. Si le modèle s'est déjà exécuté, c'est à dire sa dernière date d'exécution $\tau_{-1}Mplant$ est inférieure ou égale à la date courante on entame le calcul de la future date d'exécution du modèle de croissance des plantes (M_{plant}).

On commence par demander à l'entité responsable de l'exécution du modèle $ModAgent_{Mplant}$ la dernière date d'exécution du modèle $Mplant_{lastExecutionDate}$. Cette date sera stockée dans $\tau_{-1}Mplant$. La variable Δ permet de stocker l'échelle temporelle du modèle $Mplant_{temporalScale}$. Comme il s'agit d'un modèle à pas de temps discrets ce délai sera donc une constante égale à 1. La future date d'exécution τ_{Mplant} sera calculée en fonction de la dernière date d'exécution du modèle de pluviométrie $\tau_{-1}Mplant$ et du délai d'exécution Δ . La nouvelle date d'exécution calculée τ_{Mplant} , l'identifiant du modèle (M_{plant}), sa priorité $Mplant_{priority}$ ainsi que son autorisation d'exécution $Mplant_{authorization}$ seront envoyés à l'entité $SchedulerEntity$.

Une fois les futures dates d'exécution des modèles calculées, il faudra les ordonner en prenant en considération la différence des échelles temporelles des deux modèles. Cette procédure d'ordonnancement sera assurée par l'agent ordonnanceur dont l'algorithme est présenté dans la section suivante.

6.2.3 Ordonnancement des dates d'exécution des modèles

Nous présentons dans ce qui suit, les étapes de l'ordonnancement de dates d'exécution des modèles dans un calendrier donné. Il s'agit de la dernière étape de la gestion des échelles temporelles qui vient suite au calcul des futures dates d'exécution. Ces étapes sont formalisées dans

l'algorithme d'ordonnancement (Algorithme 5) qui sera exécuté par l'entité responsable de l'ordonnancement des dates de la simulation *SchedulerEntity*. Le fonctionnement de l'algorithme d'ordonnancement sera illustré également par l'exemple fil rouge. On présente donc dans ce qui suit l'algorithme qui permet d'ordonnancer les dates d'exécution des modèles de pluviométrie et de croissance des plantes.

Algorithm 5 L'algorithme d'ordonnancement de la future date d'exécution du modèle

1: **procedure** MODELSCHEDULING($(\mathbf{M}_i, calendar)$) ▷ avec (\mathbf{M}_i) l'identifiant du modèle ayant la priorité $\mathbf{M}_i_{priority}$ et l'autorisation d'exécution $\mathbf{M}_i_{authorization}$, $calendar$ le calendrier prévu pour l'ordonnancement des dates d'exécution des modèles avec $calendar$ une liste ordonnée contenant les futures dates d'exécution des modèles
Require: τ_{Mi} la future date d'exécution du modèle (\mathbf{M}_i)
2: **for each** Mi in Models **do**
3: $Insert(\mathbf{M}_i, \tau_{Mi}, \mathbf{M}_i_{priority}, \mathbf{M}_i_{authorization})$
4: $Sort(calendar)$
5: $\mathbf{M}_{head} \leftarrow Head(calendar)$
6: $\mathbf{M}_{head}_{authorization} \leftarrow True$
7: $Delete(calendar)$
8: **end for**
9: **end procedure**

6.2.3.1 Ordonnancement des dates d'exécution par l'agent scheduleur des modèles de l'exemple fil rouge

Nous présentons dans cette section, les étapes de l'ordonnancement des dates d'exécution des modèles relatifs à notre exemple fil rouge. Ces étapes sont formalisées dans l'algorithme d'ordonnancement des dates (Algorithme 6) qui se déroule comme suit :

Algorithm 6 Algorithme de l'agent ordonnanceur de l'exemple fil rouge

1: **for each** Mi in Models **do**
2: **if** $Head(calendar) \neq NIL$ **then**
3: $Insert(DataReceiving(\mathbf{TimeAgent}_{Mplant}, \mathbf{M}_{plant}, \tau_{Mplant}, \mathbf{M}_{plant}_{priority}))$
4: $Sort(calendar)$
5: $\mathbf{M}_{head} \leftarrow Head(calendar)$
6: $\mathbf{M}_{head}_{authorization} \leftarrow True$
7: $DataSending(\mathbf{TimeAgent}_{Mhead}, \mathbf{M}_{head}_{authorization})$
8: $Delete(calendar)$
9: **end if**
10: **end for**

Description de l'algorithme d'ordonnancement de l'exemple fil rouge (Algorithme 6)

La procédure d'ordonnancement des modèles sera exécutée par l'agent *SchedulerAgent*. Nous allons montrer à travers cet exemple, l'ordonnancement d'une date d'exécution du modèle de croissance des plantes qui sera par hypothèse exécuté en premier. Cet algorithme sera exécuté

pour chacun des modèles de l'exemple fil rouge à chaque fois qu'une nouvelle date d'exécution est envoyée. L'ordonnancement consiste à insérer la future date d'exécution t_{Mplant} dans la liste ordonnée *calendar* suivie de l'identifiant du modèle (M_{plant}), de sa priorité $M_{plant}_{priority}$ et de l'autorisation $M_{plant}_{authorization}$ envoyés de la part de l'agent $\mathbf{TimeAgent}_{Mplant}$.

Ainsi à chaque nouvelle insertion, les dates d'exécution seront triées dans un ordre croissant avec la fonction *Sort*. La fonction *Head* permet de récupérer le modèle M_{head} à la tête de la liste ayant la plus petite date d'exécution. Le modèle sélectionné obtiendra l'autorisation d'exécution où sa propriété $M_{head}_{authorization}$ recevra la valeur *True*. Cette autorisation sera envoyée à l'agent temps $\mathbf{TimeAgent}_{Mhead}$ correspondant au modèle à la tête de la liste ordonnée. Le modèle à la tête de la liste doit être supprimé pour céder la place au modèle suivant.

L'ordonnancement des dates d'exécution par l'agent ordonnanceur constitue le cœur de notre procédure de gestion de l'hétérogénéité temporelle. Cet exemple fil rouge nous a permis d'illustrer une mise en œuvre des différents algorithmes de gestion de l'hétérogénéité temporelle des modèles dans le cadre du couplage multi-échelles. La gestion des échelles temporelles doit être suivie de la gestion des échelles spatiales des modèles. Ainsi, nous présentons dans ce qui suit les algorithmes nécessaires au traitement de l'hétérogénéité spatiale des modèles.

6.3 Les algorithmes de gestion des échelles spatiales

Nous présentons dans ce qui suit comment se fait la gestion de la différence des échelles spatiales sous la forme d'algorithmes. Nous présentons ici également deux versions d'algorithmes : une version centralisée et une version distribuée. Ces deux versions sont utilisables en dehors du couplage pour gérer la différence des échelles spatiales entre modèles ou dynamiques d'un même modèle. La version distribuée est destinée aux implémentations orientées processus ou agents. La distribution se fera au travers de trois algorithmes qui traitent chacun une étape de la gestion des échelles spatiales des modèles. Dans ces algorithmes l'espace est utilisé comme un facteur de couplage, ainsi l'échelle de chaque modèle est adaptée à l'échelle de l'espace étudié, ce qui nous permet indirectement d'adapter les échelles des modèles les unes aux autres.

Nous présentons donc dans ce qui suit un algorithme principal pour la gestion de la différence des échelles spatiales (Algorithme 7), des algorithmes distribués d'exécution du modèle (Algorithme 8), de collecte des données (Algorithme 11) et de spatialisation des données (Algorithme 14).

6.3.1 L'algorithme principal de la gestion spatiale

Il s'agit de l'algorithme principal de la gestion de la différence des échelles spatiales qui doit être exécuté par l'entité responsable des échelles spatiales des modèles. Dans un premier temps, on se propose de distinguer les étapes relatives à la gestion de la différence des échelles dans la figure (Fig. 6.2). L'ensemble de ces étapes sera formalisé par la suite dans l'algorithme de gestion des échelles spatiales (Algorithme 7). Chaque étape présentée dans cette figure sera formalisée dans une ou plusieurs lignes de l'algorithme (Algorithme 7).

Description de l'algorithme principal de la gestion spatiale (Algorithme 7)

Cette procédure *ECHELLESPATIALE* (Mi, S) a pour rôle de gérer la différence des échelles spatiales des modèles en utilisant l'espace comme facteur de couplage. Elle prend comme paramètre Mi l'identifiant d'un modèle donné ayant l'échelle spatiale $Mi_{spatialScale}$, l'autorisation

d'exécution $\mathbf{Mi}_{\text{authorization}}$, le vecteur des entrées \vec{Mi}_{input} , le vecteur des sorties \vec{Mi}_{output} et une dernière date d'exécution $\mathbf{Mi}_{\text{lastExecutionDate}}$ ainsi que l'espace S ayant l'échelle spatiale $S_{\text{spatialScale}}$. Ces échelles spatiales seront exprimées sous forme de chaîne de caractères (ville, parcelle, cellule, etc). On considère également KB , une base de connaissance qui contient la donnée, son équivalent dans l'espace, et sa règle d'interprétation, $\vec{Mi}_{\text{requestedInput}}$ le vecteur des entrées interprétées dans la base des connaissances, $\vec{collectedData}$ le vecteur des données collectées à partir de l'espace, $\vec{Mi}_{\text{spatialInput}}$ le vecteur des données collectées à partir de l'espace qui vont servir d'entrées au modèle à exécuter, $\vec{Mi}_{\text{spatialOutput}}$ le vecteur des sorties interprétées dans la base des connaissances et $\vec{scaledDataToSpatialize}$ le vecteur des sorties du modèle converties à l'échelle de l'espace.

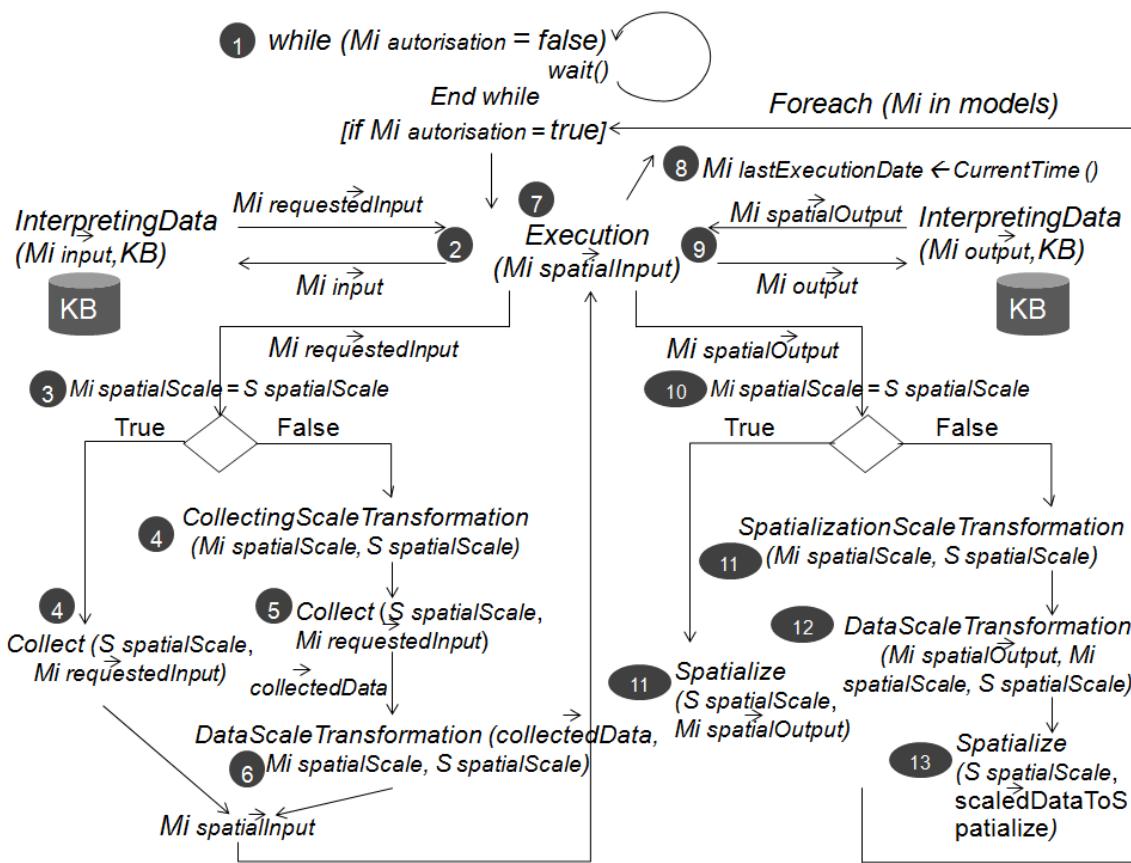


FIGURE 6.2 – Les étapes de l'algorithme principal pour la gestion de la différence des échelles spatiales

Cette procédure sera exécutée pour chaque modèle (M_i) des modèles ou des dynamiques multi-échelles. Tant que le modèle n'a pas reçu une autorisation d'exécution ($\mathbf{Mi}_{\text{authorization}}$ égale à *False*). Le programme doit se mettre en attente (grâce à la fonction *wait()*) jusqu'à la réception d'une autorisation d'exécution. A partir du moment où l'autorisation d'exécution devient égale à *True* le programme peut exécuter le reste des instructions. Ainsi on commence par récupérer le vecteur $\vec{Mi}_{\text{requestedInput}}$ qui constitue l'équivalent du vecteur des entrées \vec{Mi}_{input} dans la base de connaissances KB . Si l'échelle du modèle $Mi_{\text{spatialScale}}$ est différente de l'échelle de l'espace $S_{\text{spatialScale}}$. On entame le processus de changement d'échelles par la procédure *Col-*

lectingScaleTransformation. Il s'agit d'une procédure qui sera spécifiée par le modélisateur en fonction des échelles à traiter. Elle peut consister par exemple à créer de nouveaux niveaux hiérarchiques de collecte à l'échelle de l'espace. Les données nécessaires à l'exécution du modèle *collectedData* seront collectées à partir de l'espace avec une fonction de collecte *Collect* qui aura besoin de connaître l'échelle de l'espace ainsi que les données demandées $Mi_{requestedInput}$). Une fois que la collecte est finie, il est nécessaire de convertir ces données *collectedData* de l'échelle $S_{spatialScale}$, à l'échelle du modèle $Mi_{spatialScale}$ par une fonction *DataScaleTransformation*.

Algorithm 7 Algorithme de gestion de la différence des échelles spatiales

```

1: procedure ECHELLESPATIALE( $M_i$ ,  $S$ ) ▷
   avec  $M_i$  l'identifiant d'un modèle donné ayant l'échelle spatiale  $Mi_{spatialScale}$ , l'autorisation
   d'exécution  $\mathbf{Mi}_{authorization}$ , le vecteur des entrées  $Mi_{input}$ , le vecteur des sorties  $Mi_{output}$  et
   une dernière date d'exécution  $\mathbf{Mi}_{lastExecutionDate}$ ,  $S$  l'espace modélisé ayant l'échelle spatiale
    $S_{spatialScale}$ 
Require:  $KB$ , une base de connaissance qui contient la donnée, son équivalent dans l'espace,
   et sa règle d'interprétation
Require:  $Mi_{requestedInput}$  le vecteur des entrées interprétées dans la base des connaissances
Require:  $collectedData$  le vecteur des données collectées à partir de l'espace
Require:  $Mi_{spatialInput}$  le vecteur des données données collectées à partir de l'espace qui vont
   servir d'entrées au modèle à exécuter
Require:  $Mi_{spatialOutput}$  le vecteur des sorties interprétées dans la base des connaissances
Require:  $scaledData\vec{T}oSpatialize$  le vecteur des sorties du modèle converties à l'échelle de
   l'espace
2:   for each  $Mi$  in Models do
3:     while  $\mathbf{Mi}_{authorization} = false$  do
4:       wait()
5:     end while
6:     if  $\mathbf{Mi}_{authorization} = true$  then
7:        $Mi_{requestedInput} \leftarrow \text{InterpretingData} (Mi_{input}, KB)$ 
8:       if  $Mi_{spatialScale} \neq S_{spatialScale}$  then
9:          $\text{CollectingScaleTransformation}(Mi_{spatialScale}, S_{spatialScale})$ 
10:         $collectedData \leftarrow \text{Collect} (S_{spatialScale}, Mi_{requestedInput})$ 
11:         $Mi_{spatialInput} \leftarrow \text{DataScaleTransformation} (collectedData, S_{spatialScale}, Mi_{spatialScale})$ 
12:      else
13:         $Mi_{spatialInput} \leftarrow \text{Collect} (S_{spatialScale}, Mi_{requestedInput})$ 
14:      end if
15:       $Mi_{output} \leftarrow \text{Execution} (Mi_{spatialInput})$ 
16:       $\mathbf{Mi}_{lastExecutionDate} \leftarrow \text{CurrentTime}()$ 
17:       $Mi_{spatialOutput} \leftarrow \text{InterpretingData} (Mi_{output}, KB)$ 
18:      if  $Mi_{spatialScale} \neq S_{spatialScale}$  then
19:         $\text{SpatializationScaleTransformation} (Mi_{spatialScale}, S_{spatialScale})$ 
20:         $scaledData\vec{T}oSpatialize \leftarrow \text{DataScaleTransformation}$ 
    $(Mi_{spatialOutput}, Mi_{spatialScale}, S_{spatialScale})$ 
21:         $\text{Spatialize} (S_{spatialScale}, scaledData\vec{T}oSpatialize)$ 
22:      else
23:         $\text{Spatialize} (S_{spatialScale}, Mi_{spatialOutput})$ 
24:      end if
25:    end if
26:  end for
27: end procedure

```

Avec :

- $wait()$: une fonction qui permet au programme d'attendre jusqu'à ce que la condition de la boucle ne soit plus respectée ;

- *InterpretingData* (α, KB) une fonction d’interprétation qui permet de lire une donnée α dans la base de connaissance KB et retourner la donnée spatiale équivalente ;
- *Collect* ($spatialScale, \alpha$) une fonction qui permet de collecter une donnée α à une échelle $spatialScale$ et retourner sa valeur dans l’espace ;
- *CollectingScaleTransformation* ($spatialScale1, spatialScale2$) une procédure de transformation d’une échelle de collecte $spatialScale1$ à une autre échelle $spatialScale2$;
- *DataScaleTransformation* ($\alpha, spatialScale1, spatialScale2$) une procédure qui permet de transformer une donnée α d’une échelle spatiale $spatialScale1$ à une autre échelle spatiale $spatialScale2$;
- *Execution* (α) une fonction qui permet d’exécuter un modèle en utilisant l’entrée spatiale α ;
- *SpatializationScaleTransformation* ($spatialScale1, spatialScale2$) une procédure de transformation d’une échelle de spatialisation $spatialScale1$ à une autre échelle $spatialScale2$;
- *Spatialize* ($spatialScale, \alpha$) une procédure qui permet de spatialiser une donnée α à une échelle $spatialScale$.

Le corps de cette fonction sera spécifié par le modélisateur en fonction des échelles et de la nature des données manipulées il peut s’agir par exemple d’une fonction qui calcule la somme ou la moyenne des données collectées pour les convertir à une plus grande échelle hiérarchique. Le vecteur des données converties $Mi_{\overset{\rightarrow}{spatialInput}}$ sera récupéré pour servir d’entrée au modèle qu’on cherche à exécuter. Ceci permettra d’exécuter le modèle en tenant compte des changements effectués sur l’espace par les autres modèles. En cas d’égalité des échelles ($S_{spatialScale}$ égal à $Mi_{spatialScale}$), on entame directement la collecte des données demandées $Mi_{\overset{\rightarrow}{requestedInput}}$ à partir de l’espace. L’exécution du modèle basée sur le vecteur des entrées spatiales $Mi_{\overset{\rightarrow}{spatialInput}}$ permettra de générer le vecteur de sorties des modèles $Mi_{\overset{\rightarrow}{output}}$. La date de fin d’exécution sera stockée dans $Mi_{lastExecutionDate}$ qui prendra la date courante retournée par la fonction *Current-Time()*. Ces sorties seront interprétées dans la base de connaissances pour générer un nouveau vecteur de sorties spatiales $Mi_{\overset{\rightarrow}{spatialOutput}}$. Avant d’entamer la spatialisation des données on vérifie la concordance des échelles spatiales. En cas de différence des échelles spatiales. On entame le processus de changement d’échelles par la procédure *SpatializationScaleTransformation*.

Comme pour la procédure de changement de l’échelle de la collecte, il s’agit d’une procédure qui sera spécifiée par le modélisateur en fonction des échelles à traiter. Elle peut consister par exemple à créer de nouveaux niveaux hiérarchiques de spatialisation à l’échelle de l’espace. Par la suite, il sera nécessaire de convertir les sorties du modèle $Mi_{\overset{\rightarrow}{spatialOutput}}$ de l’échelle $Mi_{spatialScale}$, à l’échelle de l’espace $S_{spatialScale}$ par une fonction *DataScaleTransformation*. Le corps de cette fonction sera spécifié par le modélisateur en fonction des échelles et de la nature des données manipulées il peut s’agir par exemple d’une fonction qui calcule le quotient ou la moyenne des données à spatialiser pour les convertir à une échelle plus petite. Le vecteur des sorties converties $scaledData \vec{to} Spatialize$ sera intégré au niveau de l’espace par la fonction *Spatialize*. En cas d’égalité des échelles, on entame directement la spatialisation du vecteur des sorties spatiales du modèle à savoir le vecteur $Mi_{\overset{\rightarrow}{spatialInput}}$.

Nous présentons dans la section suivante, la version distribuée de la gestion de la différence des échelles spatiales adaptée aux systèmes multi-agents, sous forme de trois algorithmes : l’algorithme 8 qui permettra à l’entité modèle *ModelEntity* d’exécuter le modèle (M_i) qui lui est associé, l’algorithme 11 qui permettra à l’entité de collecte *CollectorEntity* de collecter les entrées spatiales du modèle (M_i) qui lui est associé et l’algorithme 14 qui permettra à l’entité de spatialisation *SpatializationEntity* de spatialiser les sorties du modèle (M_i).

6.3.2 Exécution des modèles

La différence entre la version centralisée et la version distribuée se situe dans la division de l'algorithme entre plusieurs entités qui peuvent être des processus ou des agents. Ainsi l'entité *ModelEntity* assurera l'exécution du modèle (M_i) qui lui est associé en utilisant l'algorithme 8 présenté dans ce qui suit.

Algorithm 8 L'algorithme d'exécution des modèles

```

1: procédure MODELEXECUTION( $(M_i, S)$ ) ▷
   avec  $M_i$  l'identifiant d'un modèle donné ayant l'autorisation d'exécution  $\mathbf{Mi}_{authorization}$ , le
   vecteur des entrées  $Mi_{input}$ , le vecteur des sorties  $Mi_{output}$  et une dernière date d'exécution
    $Mi_{lastExecutionDate}$ ,  $S$  l'espace modélisé
Require:  $Mi_{requestedInput}$  le vecteur des entrées interprétées dans la base des connaissances
Require:  $Mi_{spatialInput}$  le vecteur des données collectées à partir de l'espace qui vont servir
   d'entrées au modèle à exécuter
Require:  $Mi_{spatialOutput}$  le vecteur des sorties interprétées dans la base des connaissances
Require:  $KB$  une base de connaissance qui contient la donnée, son équivalent dans l'espace, et
   sa règle d'interprétation
Require: authorization une variable permettant de stocker l'autorisation d'exécution du modèle
2:   for each  $Mi$  in Models do
3:     authorization  $\leftarrow \mathbf{Mi}_{authorization}$ 
4:     if authorization = False then
5:       wait()
6:     else
7:        $Mi_{requestedInput} \leftarrow \text{InterpretingData } (Mi_{input}, KB)$ 
8:        $Mi_{spatialInput} \leftarrow \text{COLLECTINGDATA } (Mi_{requestedInput}, \mathbf{Mi}_{spatialScale}, S_{spatialScale})$ 
9:        $Mi_{output} \leftarrow \text{Execution } (Mi_{spatialInput})$ 
10:       $\mathbf{Mi}_{lastExecutionDate} \leftarrow \text{CurrentTime}()$ 
11:       $Mi_{spatialOutput} \leftarrow \text{InterpretingData } (Mi_{output}, KB)$ 
12:       $\text{SpatializationData } (Mi_{spatialOutput}, \mathbf{Mi}_{spatialScale}, S_{spatialScale})$ 
13:    end if
14:   end for
15: end procédure

```

Avec :

- *InterpretingData* (α, KB) une fonction d'interprétation qui permet de lire une donnée α dans la base de connaissance KB et retourner la donnée spatiale équivalente ;
- *CurrentTime()* une fonction qui retourne la date courante du système ;
- *Execution* (\vec{X}) : une procédure qui permet d'exécuter le modèle en utilisant le vecteur des entrées collectées à partir de l'espace \vec{X} ;
- *CollectingData* ($\vec{Y}, S_{spatialScale}, \mathbf{Mi}_{spatialScale}$) : une fonction qui permet de collecter un vecteur de données \vec{Y} à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$ et le transmettre à l'échelle du modèle $\mathbf{Mi}_{spatialScale}$;
- *SpatializationData* ($\vec{Z}, \mathbf{Mi}_{spatialScale}, S_{spatialScale}$) : une procédure qui permet de récupérer un vecteur de données \vec{Z} à l'échelle du modèle $\mathbf{Mi}_{spatialScale}$ pour le spatialiser à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$;

- *wait()* : une procédure qui permet à une entité donnée de se mettre en attente.

Nous proposons dans ce qui suit une mise en œuvre de l'algorithme d'exécution des modèles, précédemment présenté, à travers notre exemple fil rouge afin d'expliquer comment cet algorithme d'exécution peut être utilisé dans la modélisation des dynamiques multi-échelles.

6.3.2.1 Application à l'exemple fil rouge : exécution du modèle de pluviométrie

Nous présentons dans ce qui suit une formalisation des étapes de l'exécution des modèles de pluviométrie basée sur les données collectées de l'espace et qui produira des données à retourner dans ce même espace. Notons que par rapport à l'algorithme générique d'exécution, dans cet algorithme d'exécution du modèle de pluviométrie, le modèle sera nommé *Mpluv*, l'agent d'exécution relatif à ce modèle sera nommé *ModAgent_{Mpluv}*.

Le premier algorithme relatif à l'exécution du modèle de pluviométrie (Algorithme 9) et sa description seront présentés dans ce qui suit.

Algorithm 9 Algorithme de l'agent modèle de pluviométrie

```

1: authorization  $\leftarrow$  ModAgentMpluv.DataReceiving(TimeAgentMpluv, Mpluvauthorization)
2: if authorization = false then
3:   ModAgentMpluv.wait()
4: else
5:    $Q_{BIOMdem} \leftarrow$  ModAgentMpluv.InterpretingData( $Q_{CO2}$ , KB)
6:    $Q_{BIOMcollec} \leftarrow$  ModAgentMpluv.DataReceiving(CollecAgentMpluv,  $Q_{BIOMdem}$ , S)
7:    $Q_{H2O} \leftarrow$  ModAgentMpluv.Execute( $Q_{BIOMcollec}$ )
8:   MpluvlastExecution  $\leftarrow$  CurrentTime()
9:   ModAgentMpluv.DataSending(SpatiaAgentMpluv,  $Q_{H2O}$ )
10:  ModAgentMpluv.DataSending(TimeAgentMpluv, MpluvlastExecution)
11: end if

```

Notons que pour les algorithmes relatifs aux modèles de l'exemple fil rouge nous allons utiliser :

- *DataReceiving(Entity, α)* : une méthode qui permet de demander à l'entité *Entity* une donnée α ;
- *DataSending(Entity, α)* : une méthode qui permet d'envoyer à l'entité *Entity* une donnée α ;
- *wait()* : une procédure qui permet à un agent de se mettre en attente.

Description de l'algorithme de l'agent du modèle de pluviométrie (Algorithme 9)

L'exécution du modèle est assurée par l'agent *ModAgent_{Mpluv}*. La variable *authorization* permettra de récupérer l'autorisation accordée au modèle **Mpluv**_{authorization} envoyée par l'agent *TimeAgent_{Mpluv}*. Tant que le modèle n'a pas reçu une autorisation d'exécution (**Mi**_{authorization} égale à *False*). L'agent modèle *ModAgent_{Mpluv}* doit se mettre en attente (grâce à la fonction *wait()*) jusqu'à la réception d'une autorisation d'exécution. A partir du moment où l'autorisation d'exécution devient égale à *True* on commence le processus d'exécution du modèle. Comme l'entrée du modèle Q_{CO2} n'est pas une donnée spatiale (elle n'est pas stockée dans l'espace), l'agent modèle va chercher son équivalent dans la base de connaissances *KB*. Ainsi la fonction *InterpretingData()* va chercher dans la base *KB* la donnée spatiale équivalente à la quantité

Q_{CO2} qui est en l'occurrence la quantité de biomasse $Q_{BIOMdem}$ étant donné que la biomasse est responsable de la production du $CO2$.

Par la suite, l'agent modèle *ModAgent* va demander à l'agent collecteur *CollecAgent* appartenant à son groupe d'agents d'aller chercher cette donnée spatiale $Q_{BIOMdem}$. La donnée collectée sera stockée dans la variable $Q_{BIOMcollec}$. Suite à l'exécution du modèle, la sortie de celui-ci sera récupérée dans la variable Q_{H2O} . Comme cette donnée est spatiale (elle existe dans le sol de la ville) il n'y aura pas besoin de faire appel à la fonction d'interprétation pour trouver son équivalent dans la base de connaissances. La date de fin d'exécution sera stockée dans la variable $Mpluv_{lastExecutionDate}$ qui prendra la date courante retournée par la fonction *CurrentTime()*. La sortie du modèle sera envoyée à l'agent de spatialisation *SpatiaAgent* qui va se charger par la suite de la spatialisation des données du modèle \mathbf{M}_{pluv} . De même la dernière date d'exécution du modèle $Mpluv_{lastExecutionDate}$ sera envoyée à l'agent temps $TimeAgent_{Mpluv}$ du modèle de pluviométrie.

Ce même algorithme sera utilisé aussi pour l'exécution du modèle de croissance des plantes dont l'algorithme sera présenté dans la section suivante.

6.3.2.2 Application à l'exemple fil rouge : exécution du modèle de croissance des plantes

De même que pour l'algorithme d'exécution du modèle de pluviométrie, par rapport à la version générique de l'algorithme d'exécution des modèles, le modèle sera nommé *Mplant*, l'agent d'exécution relatif à ce modèle. On utilisera les fonctions d'envoi et de réception des données indiquées précédemment à savoir (*DataReceiving(Entity, α)* et *DataReceiving(Entity, α)*).

Ainsi l'agent responsable de l'exécution du modèle de croissance des plantes, suivra l'algorithme suivant (Algorithme 10) :

Algorithm 10 Algorithme de l'agent modèle de croissance des plantes

```

1:  $authorization \leftarrow ModAgent_{Mplant}.DataReceiving(TimeAgent_{Mplant}, \mathbf{Mplant}_{authorization})$ 
2: if  $authorization = false$  then
3:    $ModAgent_{Mplant}.wait()$ 
4: else
5:    $Q_{H2Ocollec} \leftarrow ModAgent_{Mplant}.DataReceiving(CollecAgent_{Mplant}, Q_{H2O}, S)$ 
6:    $Q_{BIOM} \leftarrow ModAgent_{Mplant}.Execute(Q_{H2Ocollec})$ 
7:    $\mathbf{Mplant}_{lastExecution} \leftarrow CurrentTime()$ 
8:    $ModAgent_{Mplant}.DataSending(SpatiaAgent_{Mplant}, Q_{BIOM})$ 
9:    $ModAgent_{Mplant}.DataSending(TimeAgent_{Mplant}, \mathbf{Mplant}_{lastExecution})$ 
10: end if

```

Description de l'algorithme de l'agent modèle de croissance des plantes (Algorithm 10)

L'exécution du modèle est assurée par l'agent *ModAgent_{Mplant}*. La variable *authorization* permettra de récupérer l'autorisation accordée au modèle $\mathbf{Mpluv}_{authorization}$ envoyée par l'agent *TimeAgent_{Mpluv}*. Tant que le modèle n'a pas reçu une autorisation d'exécution ($\mathbf{Mi}_{authorization}$ égale à *False*). L'agent modèle *ModAgent_{Mpluv}* doit se mettre en attente (grâce à la fonction *wait()*) jusqu'à la réception d'une autorisation d'exécution. A partir du moment où l'autorisation d'exécution devient égale à *True* on commence le processus d'exécution du modèle. L'agent

modèle $ModAgent_{Mplant}$ va demander l'entrée spatiale Q_{H2O} à l'agent collecteur $CollecAgent$ appartenant à son groupe d'agents.

Comme cette donnée est spatiale (elle existe dans le sol de la ville) il n'y aura pas besoin de faire appel à la fonction d'interprétation pour trouver son équivalent dans la base de connaissances. La donnée collectée $Q_{H2O_{collec}}$ par l'agent de collecte $CollecAgent$ sera récupérée par l'agent modèle $ModAgent$ pour servir d'entrée au modèle. En utilisant cette entrée collectée à partir de l'espace $Q_{H2O_{collec}}$ l'output du modèle sera récupéré dans la variable Q_{BIOM} . La date de fin d'exécution sera stockée dans la variable $Mplant_{lastExecutionDate}$ qui prendra la date courante retournée par la fonction $CurrentTime()$. Cette sortie sera envoyée à l'agent de spatialisation $SpatiaAgent_{Mplant}$ qui se chargera par la suite de la spatialisation des données du modèle (M_{plant}). De même la dernière date d'exécution du modèle $Mplant_{lastExecutionDate}$ sera envoyée à l'agent temps $TimeAgent_{Mplant}$ du modèle de pluviométrie.

L'exécution de ces deux modèles nécessite une collecte des données spatiales $Q_{H2O_{collec}}$ et $Q_{BIOM_{collec}}$ à partir des zones vertes de la ville. Cette procédure de collecte sera assurée par les agents collecteurs dont les algorithmes seront détaillés dans ce qui suit. Pour pouvoir s'exécuter convenablement les modèles ont besoin d'avoir les données collectées à partir de l'espace. Cette fonction de collecte sera assurée par une autre entité au travers d'un algorithme de collecte distribué.

6.3.3 Collecte des données des modèles

Nous présentons dans ce qui suit, les étapes de la collecte des données qui permettra d'adapter les données de l'espace à l'échelle du modèle. La différence entre la version centralisée et la version distribuée se situe dans la spécification des fonctions relatives à la transformation des échelles. En effet, dans la version distribuée où la collecte est assurée par une entité spécifique, il est possible de décomposer cette dernière pour atteindre un niveau d'abstraction donné. Ainsi dans la version distribuée, la fonction $CollectingScaleTransformation$ ($spatialScale1$, $spatialScale2$) sera remplacée par une fonction de création de nouvelles entités de collecte à l'échelle souhaitée $spatialScale2$ (la fonction *create* dans l'algorithme 11).

La fonction $DataScaleTransformation(\alpha, spatialScale1, spatialScale2)$ qui permet de transformer une donnée α d'une échelle spatiale $spatialScale1$ à une autre échelle spatiale $spatialScale2$ sera remplacée par une boucle (boucle For de l'algorithme 11) qui permet à une entité de niveau supérieur de calculer les résultats retournés par les entités de niveau inférieur afin de les convertir à son échelle. Ces étapes sont formalisées dans l'algorithme de collecte (Algorithme 11). Nous présentons dans cette section les algorithmes des agents responsables de la collecte des données pour les modèles de l'exemple fil rouge. Ces algorithmes permettent respectivement de collecter les entrées du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes.

6.3.3.1 Application à l'exemple fil rouge : collecte des entrées du modèle de pluviométrie

Notons que par rapport à l'algorithme générique de collecte, dans cet algorithme de collecte du modèle de pluviométrie, le modèle sera nommé $Mpluv$, l'agent de collecte relatif au modèle sera nommé $CollecAgent_{Mpluv}$, la fonction $F(\alpha)$ (dans l'algorithme 11) sera remplacée par une opération de sommation des données. Ceci revient au fait que l'agent collecteur du modèle $CollecAgent_{Mpluv}$ aura à sommer les données collectées par l'agent de collecte à l'échelle de l'espace $CollecAgent_S$ pour pouvoir les convertir à l'échelle du modèle de pluviométrie.

Ainsi nous présentons dans cette section l'algorithme relatif à la collecte des entrées du modèle de pluviométrie (Algorithme 12) suivi de sa description détaillée avec :

- $F(\alpha)$: une fonction qui permet d'effectuer un calcul spécifique sur des données (qui peut être une somme, une moyenne, un quotient d'une division, etc) visant à adapter des données à une échelle inférieure ou supérieure ;
- $CountGeographicalUnits(UNIT1, UNIT2)$: une fonction qui retourne le nombre d'unités géographiques $UNIT1$ dans une unité $UNIT2$ (par exemple : le nombre de bâtiments dans une parcelle,etc) ;
- $Collect(Entity_{spatialScale}, \alpha)$ une fonction qui permet à une entité de collecter une donnée α à une échelle $spatialScale$.

Algorithm 11 L'algorithme de collecte des données

1: **function** $\vec{COLLECTINGDATA}(\vec{Mi_{requestedInput}}, \vec{Mi_{spatialScale}}, \vec{S_{spatialScale}})$ ▷ avec
 $\vec{Mi_{requestedInput}}$ les entrées du modèle à collecter à partir de l'espace, $\vec{S_{spatialScale}}$ l'échelle
 spatiale de l'espace modélisé, $\vec{Mi_{spatialScale}}$ l'échelle spatiale du modèle Mi

Require: j un compteur

Require: n une variable permettant de stocker le nombre d'unités géographiques à l'échelle de l'espace

Require: $\vec{requestedData}$ le vecteur des données à collecter à partir de l'espace

Require: $\vec{scaledCollectedData}$ le vecteur des données collectées à partir de l'espace

Require: $\vec{collectedData}$ le vecteur des données collectées à l'échelle du modèle

Require: $\vec{Mi_{spatialInput}}$ le vecteur des données collectées à partir de l'espace qui vont servir d'entrées au modèle à exécuter

2: $\vec{requestData} \leftarrow \vec{Mi_{requestedInput}}$

3: **if** $Mi_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$ **then**

4: $\vec{Create}(\vec{CollectorEntity}_{S_{spatialScale}})$

5: $n \leftarrow \vec{CountGeographicalUnits}(S_{spatialScale}, Mi_{spatialScale})$

6: **for** $j = 1$ to n **do**

7: $\vec{scaledCollectedData} \leftarrow \vec{Collect}(\vec{CollectorEntity}_{S_{spatialScale}}, \vec{requestData})$

8: $\vec{collectedData} \leftarrow F(\vec{scaledCollectedData})$

9: **end for**

10: $\vec{Mi_{spatialInput}} \leftarrow \vec{collectedData}$

11: **else**

12: $\vec{Mi_{spatialInput}} \leftarrow \vec{Collect}(\vec{CollectorEntity}_{Mi_{spatialScale}}, \vec{requestData})$

13: **end if**

14: **return** $\vec{Mi_{spatialInput}}$

end function

Algorithm 12 Algorithme de l'agent collecteur du modèle de pluviométrie

```

1:  $CollecAgent_{Mpluv}.requestedData \leftarrow CollecAgent_{Mpluv}.DataReceiving(ModAgent_{Mpluv}, Q_{BIOMdem})$ 
2: if  $Mpluv_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$  then
3:    $CollecAgent_{Mpluv}.Create(CollecAgents_S)$ 
4:    $n \leftarrow CountGeographicalUnits(Cell, S)$ 
5:   for  $j = 1$  to  $n$  do
6:      $CollecAgent_S.collectedData \leftarrow CollecAgents_S.Collect(CollecAgent_{Mpluv}.requestedData)$ 
7:      $CollecAgent_{Mpluv}.collectedData \leftarrow \Sigma CollecAgent_S.collectedData$ 
8:   end for
9:    $Q_{BIOMcollec} \leftarrow CollecAgent_{Mpluv}.collectedData$ 
10: end if
       $CollecAgent_{Mpluv}.DataSending(ModAgent_{Mpluv}, Q_{BIOMcollec})$ 

```

Description de l'algorithme de l'agent collecteur du modèle de pluviométrie (Algorithm 12)

La collecte des données est assurée par l'agent $CollecAgent_{Mpluv}$ responsable de la collecte pour le modèle de pluviométrie. L'agent collecteur $CollecAgent_{Mpluv}$ reçoit la donnée à collecter demandée par l'agent $ModAgent_{Mpluv}$. Il s'agit de la quantité $Q_{BIOMdem}$ qui sera stockée dans la propriété $CollecAgent_{Mpluv}.requestedData$. Comme l'échelle spatiale du modèle est supérieure à l'échelle de l'espace (l'échelle du modèle $Mpluv_{spatialScale}$ qui est la ville, est supérieure à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$ qui est la cellule) il va falloir procéder à un ensemble d'actions visant l'adaptation des échelles spatiales. Ainsi étant donné que l'agent collecteur $CollecAgent_{Mpluv}$ doit effectuer une collecte de données à une échelle supérieure à l'échelle de l'espace celui-ci va créer un agent collecteur à l'échelle de l'espace $CollecAgents_S$. Ceci correspond à la procédure de transformation de l'échelle de collecte appelée précédemment $CollectingScaleTransformation$ dans (Algorithm 7). Nous récupérons dans la variable n le résultat de la fonction $CountGeographicalUnits$ qui va calculer le nombre de cellules de l'espace étant donné que ce dernier est à l'échelle de la cellule $S_{spatialScale}$.

Par la suite, on commence les étapes de transformation d'échelles appelées précédemment $DataScaleTransformation$ dans (Algorithm 7) qui consistera dans notre cas à sommer les données. Ainsi dans une boucle de 1 à n , on va procéder à la transformation des échelles sur toutes les cellules de l'espace considéré. L'agent collecteur à l'échelle de l'espace $CollecAgents_S$ procède à la collecte avec sa fonction $Collect$ de la quantité $Q_{BIOMdem}$ contenue dans sa propriété $CollecAgent_{Mpluv}.requestedData$. Après chaque collecte l'agent collecteur à l'échelle du modèle $CollecAgent_{Mpluv}$ va sommer les données collectées par l'agent collecteur à l'échelle de l'espace $CollecAgents_S.collectedData$. L'entrée spatiale $Q_{BIOMcollec}$ qui sera envoyée au modèle de pluviométrie sera égale au contenu de la propriété $CollecAgent_{Mpluv}.collectedData$ de l'agent collecteur à l'échelle du modèle. La donnée collectée $Q_{BIOMcollec}$ est envoyée par la suite à l'agent $ModAgent_{Mpluv}$ relatif au modèle de pluviométrie.

Ce même algorithme sera utilisé aussi pour la collecte des entrées du modèle de croissance des plantes dont l'algorithme sera présenté dans la section suivante.

6.3.3.2 Application à l'exemple fil rouge : collecte des entrées du modèle de croissance des plantes

Pareil que pour le modèle de pluviométrie la différence avec l'algorithme générique de collecte, se situera dans le nom du modèle qui sera nommé $Mplant$, l'agent de collecte relatif au modèle qui sera nommé $CollecAgent_{Mplant}$. La fonction $F(\alpha)$ (dans l'algorithme 11) sera également remplacée par une opération de sommation des données collectées étant donné que l'agent collecteur du modèle $CollecAgent_{Mplant}$, qui travaille à l'échelle de la parcelle, va sommer les données collectées par l'agent de collecte à l'échelle de l'espace $CollecAgent_S$ pour pouvoir les convertir à l'échelle du modèle.

Ainsi l'agent responsable de la collecte des données du modèle de croissance des plantes $CollecAgent_{Mplant}$, suivra l'algorithme suivant (Algorithme 13). Cet algorithme sera présenté et décrit dans ce qui suit.

Description de l'algorithme de l'agent collecteur du modèle de croissance des plantes (Algorithme 13)

La collecte des données est assurée par l'agent $CollecAgent_{Mplant}$ responsable de la collecte pour le modèle de croissance des plantes. La propriété $CollecAgent_{Mplant}.requestedData$ de l'agent collecteur à l'échelle du modèle va contenir l'entrée demandée par le modèle qui est la quantité Q_{H20dem} . Comme l'échelle spatiale du modèle est supérieure à l'échelle de l'espace (l'échelle du modèle $Mplant_{spatialScale}$ qui est la parcelle, est supérieure à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$ qui est la cellule) il va falloir procéder à un ensemble d'actions visant l'adaptation des échelles spatiales. Ainsi la procédure de transformation de l'échelle de collecte appelée précédemment *CollectingScaleTransformation* va consister à créer un nouvel agent collecteur à l'échelle de l'espace $CollecAgent_S$. La variable n contiendra le résultat de la fonction *CountGeographicalUnits* qui va calculer le nombre de cellules par parcelle étant donné que l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$ correspond à la cellule.

Algorithm 13 Algorithme de l'agent collecteur du modèle de croissance des plantes

```

1:  $CollecAgent_{Mplant}.requestedData \leftarrow CollecAgent_{Mplant}.DataReceiving(ModAgent_{Mplant}.Q_{H20dem})$ 
2: if  $Mplant_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$  then
3:    $CollecAgent_{Mplant}.Create(CollecAgent_S)$ 
4:    $n \leftarrow CountGeographicalUnits(Cell, Parcel)$ 
5:   for  $j = 1$  to  $n$  do
6:      $CollecAgent_S.collectedData \leftarrow CollecAgent_S.Collect(CollecAgent_{Mplant}.requestedData)$ 
7:      $CollecAgent_{Mplant}.collectedData \leftarrow \Sigma CollecAgent_S.collectedData$ 
8:   end for
9:    $Q_{H20collec} \leftarrow CollecAgent_{Mplant}.collectedData$ 
10: end if
       $CollecAgent_{Mplant}.DataSending(ModAgent_{Mplant}, Q_{H20collec})$ 

```

Par la suite, on commence les étapes de transformation d'échelles appelées précédemment *DataScaleTransformation* qui consistera dans notre cas à sommer les données. Ainsi on utilise une boucle pour faire un même traitement de sommation et de récupération des données collectées pour l'ensemble des agents collecteurs (de 1 à n). Seul l'agent collecteur qui fonctionne à l'échelle de l'espace $CollecAgent_S$ peut assurer la collecte de la quantité Q_{H20dem} à travers sa fonction *collect*. Le résultat sera stocké dans sa propriété $CollecAgent_{Mplant}.requestedData$.

Ainsi la quantité Q_{H20dem} collectées par l'agent collecteur à l'échelle de l'espace $CollecAgent_S$ sera sommée et stockée dans la propriété *collectedData* de l'agent collecteur à l'échelle du modèle. Une fois la collecte finie, l'agent collecteur à l'échelle du modèle $CollecAgent_{Mplant}$ va envoyer la quantité $Q_{H20collec}$ à l'agent modèle $ModAgent_{Mpluv}$.

A la fin de l'exécution, le modèle de pluviométrie et le modèle de croissance des plantes produisent respectivement une quantité Q_{H2O} et une quantité Q_{BIOM} qu'il va falloir spatialiser afin de pouvoir les partager à travers l'espace. Cette procédure de spatialisation sera assurée par les agents de spatialisation dont les algorithmes seront détaillés dans ce qui suit. Ainsi, nous commençons dans la section suivante par présenter l'algorithme générique de la spatialisation des données qui sera suivi par les algorithmes de spatialisation des modèles de l'exemple fil rouge.

6.3.4 Spatialisation des données des modèles

Une fois la collecte des données finie, il va falloir exécuter le modèle et récupérer ses sorties pour les partager avec les autres modèles à travers l'espace. Cette procédure de spatialisation sera assurée par une autre entité *SpatializationEntity* dont l'algorithme sera détaillé dans ce qui suit. Comme pour la collecte, la différence entre la version centralisée et la version distribuée dans le cas de la spatialisation des données se situe dans la spécification des fonctions relatives à la transformation des échelles. Étant donné que dans la version distribuée nous manipulons des entités holoniques décomposables, la fonction *SpatializationScaleTransformation* (*spatialScale1*, *spatialScale2*) sera remplacée par une fonction de création de nouvelles entités de spatialisation à l'échelle souhaitée *spatialScale2* (la fonction *create* dans l'algorithme 14).

De même, la procédure *DataScaleTransformation*(α , *spatialScale1*, *spatialScale2*) sera remplacée par une boucle (boucle For de l'algorithme 14) qui permet à un agent de spatialisation de niveau supérieur de répartir des résultats à spatialiser sur des agents de niveau inférieur. Ainsi, les étapes de la spatialisation des sorties récupérées du modèle seront formalisées dans l'algorithme suivant (Algorithme 14).

Avec :

- $F(\alpha)$: cette fonction remplace la fonction *DataScaleTransformation* dans la version centralisée. Il s'agit d'une fonction qui permet d'effectuer un calcul sur une donnée α (somme, moyenne, division, etc) visant à adapter cette donnée à une échelle inférieure ou supérieure ;
- *CountGeographicalUnits*(*UNIT1*, *UNIT2*) : une fonction qui retourne le nombre d'unités géographiques *UNIT1* dans une *UNIT2* (par exemple : le nombre de bâtiments dans un parc, etc) ;
- *Spatialize*(*Entity_{spatialScale}*, α) une procédure qui permet à une entité de spatialiser une donnée α à une échelle *spatialScale*.

Le fonctionnement de cet algorithme sera illustré par les deux modèles de l'exemple fil rouge. On présente donc dans ce qui suit, les algorithmes qui permettent respectivement de spatialiser les sorties du modèle de pluviométrie et du modèle de croissance des plantes.

6.3.4.1 Application à l'exemple fil rouge : spatialisation des sorties du modèle de pluviométrie

Notons que par rapport à l'algorithme générique de spatialisation, dans cet algorithme de spatialisation du modèle de pluviométrie, le modèle sera nommé *Mpluv*, l'agent de spatialisation relatif au modèle sera nommé *SpatiaAgent_{Mpluv}*, la fonction $F(\alpha)$ (dans l'algorithme 14) sera

Algorithm 14 L'algorithme de spatialisation des données

```

1: procédure SPATIALIZATIONDATA( $Mi_{spatialOutput} \rightarrow$ ,  $\mathbf{Mi}_{spatialScale}$ ,  $S_{spatialScale}$ )  $\triangleright$  avec
    $Mi_{spatialOutput}$  les sorties du modèle à intégrer dans l'espace,  $S_{spatialScale}$  l'échelle spatiale de
   l'espace modélisé,  $\mathbf{Mi}_{spatialScale}$  l'échelle spatiale du modèle  $Mi$ 
Require:  $j$  un compteur
Require:  $n$  une variable permettant de stocker le nombre d'unités géographiques à l'échelle de
   l'espace
Require:  $scaledData \vec{To} Spatialize$  le vecteur des données à spatialiser transformées à l'échelle
   de l'espace
2:    $dataToSpatialize \leftarrow Mi_{spatialOutput} \rightarrow$ 
3:   if  $Mi_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$  then
4:      $Create(SpatializationEntity_{S_{spatialScale}})$ 
5:      $n \leftarrow CountGeographicalUnits(S_{spatialScale}, Mi_{spatialScale})$ 
6:     for  $j = 1$  to  $n$  do
7:        $scaledData \vec{To} Spatialize \leftarrow F(dataToSpatialize)$ 
8:        $Spatialize(SpatializationEntity_{S_{spatialScale}}, scaledData \vec{To} Spatialize)$ 
9:     end for
10:   else
11:      $Spatialize(SpatializationEntity_{S_{spatialScale}}, dataToSpatialize)$ 
12:   end if
13: end procédure

```

également remplacée par une opération de division des sorties à spatialiser. Ceci revient au fait que l'agent de spatialisation du modèle $SpatiaAgent_{Mpluv}$ aura à diviser les sorties envoyées par l'agent $ModAgent_{Mpluv}$ à l'échelle de la ville sur le nombre de cellules de chaque parcelle pour pouvoir les convertir à l'échelle de l'agent de spatialisation de l'espace $SpatiaAgent_S$ qui travaille à l'échelle de la cellule.

L'algorithme relatif à la spatialisation des données du modèle de pluviométrie (Algorithm 16) et sa description seront présentés dans ce qui suit.

Algorithm 15 Algorithme de l'agent de spatialisation du modèle de pluviométrie

```

1:  $SpatiaAgent_{Mpluv}.dataToSpatialize \leftarrow SpatiaAgent_{Mpluv}.DataReceiving(ModAgent_{Mpluv}.Q_{H2O})$ 
2: if  $Mpluv_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$  then
3:    $SpatiaAgent_{pluv}.Create(SpatiaAgent_S)$ 
4:    $n \leftarrow CountGeographicalUnits(Cell, S)$ 
5:   for  $j = 1$  to  $n$  do
6:      $SpatiaAgent_S.dataToSpatialize \leftarrow SpatiaAgent_{Mpluv}.dataToSpatialize/n$ 
7:      $SpatiaAgent_S.Spatialize(SpatiaAgent_S.dataToSpatialize)$ 
8:   end for
9: end if

```

Description de l'algorithme de l'agent de spatialisation du modèle de pluviométrie (Algorithm 16)

La spatialisation des données est assurée par l'agent $CollecAgent_{Mpluv}$ pour le modèle de pluviométrie. L'agent $SpatiaAgent_{Mpluv}$ commence par récupérer la donnée à spatialiser préce-

demment envoyée par l'agent $ModAgent_{Mpluv}$ qui est dans notre cas la quantité d'eau Q_{H2O} . Cette donnée sera stockée dans sa propriété $dataToSpatialize$. Contrairement à la collecte, dans le cas de la spatialisation des données, les données sont disponibles à l'échelle du modèle. Il va donc falloir les rendre à l'échelle de l'espace. Comme l'échelle du modèle $Mpluv_{spatialScale}$ est supérieure à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$, l'agent $SpatiaAgent_{pluv}$ va créer un agent de spatialisation à l'échelle de l'espace $SpatiaAgent_S$. Ceci correspond à la procédure de transformation de l'échelle de collecte appelée précédemment $CollectingScaleTransformation$.

Nous récupérons dans la variable n le résultat de la fonction $CountGeographicalUnits$ qui va calculer le nombre de cellules dans l'espace S . Par la suite, on commence les étapes de transformation d'échelles appelées précédemment $DataScaleTransformation$ qui consistera dans ce cas à diviser les données. Ainsi dans une boucle de 1 à n , on va procéder à la transformation des échelles sur toutes les cellules de l'espace considéré. On commence par diviser le contenu de la propriété $dataToSpatialize$ relative à l'agent $SpatiaAgent_{Mpluv}$ par le nombre de cellules n . Seul l'agent de spatialisation qui fonctionne à l'échelle de l'espace $SpatiaAgent_S$ peut assurer la fonction de la spatialisation à travers sa fonction $spatialize$.

Ce même algorithme sera utilisé aussi pour la collecte des entrées du modèle de croissance des plantes dont l'algorithme sera présenté dans la section suivante.

6.3.4.2 Application à l'exemple fil rouge : spatialisation des sorties du modèle de croissance des plantes

Pareil que pour le modèle de pluviométrie la différence avec l'algorithme générique de spatialisation, se situera dans le nom du modèle qui sera nommé $Mplant$ et l'agent de spatialisation relatif au modèle qui sera nommé $SpatiaAgent_{plant}$. La fonction $F(\alpha)$ (dans l'algorithme 14) sera également remplacée par une opération de division des sorties à spatialiser étant donné que l'agent de spatialisation du modèle $SpatiaAgent_{plant}$ qui travaille à l'échelle de la parcelle devra diviser les données calculées par l'agent du modèle de croissance des plantes $ModAgent_{Mplant}$ sur le nombre de cellule de chaque parcelle pour pouvoir les convertir à l'échelle de l'agent de spatialisation de l'espace $SpatiaAgent_S$ qui travaille à l'échelle de la cellule.

Ainsi l'agent responsable de la spatialisation des données du modèle de croissance des plantes, suivra l'algorithme suivant (Algorithme 16). Cet algorithme et sa description seront présentés dans ce qui suit.

Algorithm 16 Algorithme de l'agent de spatialisation du modèle de croissance des plantes

```

1:  $SpatiaAgent_{Mplant}.dataToSpatialize \leftarrow SpatiaAgent_S.DataReceiving(ModAgent_{Mplant}.Q_{BIOM})$ 
2: if  $Mplant_{spatialScale} <> S_{spatialScale}$  then
3:    $SpatializationEntity_{plant}.Create(SpatializationEntity_S)$ 
4:    $n \leftarrow CountGeographicalUnits(Cell, Parcel)$ 
5:   for  $j = 1$  to  $n$  do
6:      $SpatiaAgent_S.dataToSpatialize \leftarrow SpatiaAgent_{Mplant}.dataToSpatialize/n$ 
7:      $SpatiaAgent_S.Spatialize(SpatiaAgent_S.dataToSpatialize)$ 
8:   end for
9: end if

```

Description de l'algorithme de l'agent de spatialisation du modèle de croissance des plantes (Algorithme 16)

La spatialisation des données est assurée par l'agent $CollecAgent_{Mplant}$ pour le modèle de croissance des plantes. L'agent $SpatiaAgent_{Mplant}$ commence par récupérer la donnée à spatialiser précédemment envoyée par l'agent $ModAgent_{Mplant}$ qui est dans notre cas la quantité d'eau Q_{BIOM} . Cette donnée sera stockée dans sa propriété $dataToSpatialize$. Contrairement à la collecte, dans le cas de la spatialisation, les données sont disponibles à l'échelle du modèle. Il va donc falloir les rendre à l'échelle de l'espace. Comme l'échelle du modèle $Mplant_{spatialScale}$ est supérieure à l'échelle de l'espace $S_{spatialScale}$, l'agent $SpatializationEntity_{plant}$ va créer un agent de spatialisation à l'échelle de l'espace $SpatiaAgent_S$. Ceci correspond à la procédure de transformation de l'échelle de collecte appelée précédemment $CollectingScaleTransformation$. On considère n le nombre de cellules correspondantes aux zones vertes dans la grille de la ville calculé par la fonction $CountGeographicalUnits$ qui va calculer le nombre de cellules dans une parcelle.

Par la suite, on commence les étapes de transformation d'échelles appelées précédemment $DataScaleTransformation$ qui consistera dans ce cas à diviser les données. Ainsi dans une boucle de 1 à n , on va procéder à la transformation des échelles sur toutes les cellules de l'espace considéré. Ainsi l'agent $SpatiaAgent_{Mplant}$ va diviser la donnée à spatialiser Q_{BIOM} sur le nombre de cellules correspondant aux zones vertes de la ville n . Ceci permet aux agents de spatialisation subordonnés de niveau inférieur $SpatiaAgent_S$ d'obtenir les données à l'échelle souhaitée. Une fois que l'agent $SpatiaAgent_S$ obtient les données à l'échelle de l'espace, les données stockées dans sa propriété $datatospatialize$ seront intégrées dans l'espace grâce à la fonction $spatialize$. La spatialisation consiste à introduire les sorties du modèle dans l'espace étudié afin de les partager avec les autres modèles.

A la fin de cette section, nous dirons que les modèles de pluviométrie et de croissance des plantes nous ont permis d'instancier les algorithmes distribués pour la gestion de la différence des échelles spatiales et temporelles. Dans cet exemple fil rouge chaque algorithme est exécuté par un agent différent. Ainsi l'agent $ModAgent$, l'agent $SpatiaAgent$ et l'agent $CollecAgent$ vont exécuter respectivement les algorithmes d'exécution, de collecte et de spatialisation des données du modèle. L'agent $TimeAgent$ assure le calcul de la future date d'exécution et l'agent $SchedulerAgent$ s'occupe de l'ordonnancement des dates.

6.4 Synthèse et discussion

Dans ce chapitre nous avons cherché à mettre en valeur les verrous scientifiques traités dans le cadre de cette thèse et ce à travers un ensemble d'algorithmes pour la gestion de l'hétérogénéité temporelle et spatiale des échelles des modèles. Puisque l'on compte implémenter ces algorithmes avec le paradigme agent utilisé dans notre approche de couplage, nous avons séparé les algorithmes en deux versions centralisée et distribuée.

La synchronisation des modèles est orchestrée grâce à des algorithmes de gestion de l'hétérogénéité temporelle à savoir l'algorithme de calcul de la date future d'exécution et l'algorithme d'ordonnancement des dates. La gestion des échelles spatiales est assurée par trois algorithmes : un algorithme d'exécution des modèles, un algorithme de collecte des entrées et un algorithme de spatialisation des sorties. A travers la formulation algorithmique de la gestion multi-échelles spatiale et temporelle, nous cherchons à présenter une démarche générique pour gérer la différence des échelles spatiales et temporelles de plusieurs modèles en interaction.

L'ensemble de ces algorithmes a été illustré par les modèles de l'exemple fil rouge utilisant le paradigme agent. Le but est de montrer que l'architecture proposée dans notre approche de couplage est transposable dans d'autres thématiques qui traitent des phénomènes multi-échelles. Ainsi ces algorithmes peuvent constituer une base de travail pour la modélisation et la simulation de systèmes ou de phénomènes complexes spatiaux diverses.

Ces algorithmes vont servir à l'implémentation du modèle de couplage dans le chapitre suivant où on présente le cas d'étude choisi pour étudier une problématique spécifique à un système complexe spatial donné en utilisant l'approche Coupling4modeling.

Chapitre 7

Coupling4modeling dans un environnement réel

Sommaire

7.1	Introduction	150
7.2	Contexte du projet	150
7.3	Analyse des modèles et de l'environnement de la ville de Métouia	151
7.3.1	Modèle de croissance démographique	152
7.3.2	Modèle d'occupation du sol	153
7.3.3	Modèle économique	155
7.3.4	L'espace urbain de la ville	158
7.4	Construction de la base de connaissances spatiales de Métouia	159
7.5	Corrélation des modèles de la ville de Métouia via l'espace	160
7.6	Conception du modèle couplé pour la problématique d'aménagement de Métouia	162
7.6.1	Architecture du modèle couplé	162
7.6.2	Les classes du modèle de Métouia	163
7.7	Encapsulation des modèles	165
7.8	Implantation des agents en charge du couplage dans la plate-forme GAMA	166
7.8.1	Présentation de la plateforme de simulation GAMA	167
7.8.2	Application du modèle de ville de Christaller sur une grille de cellules	167
7.8.3	Couplage des trois modèles hétérogènes multi-échelles de la ville de Métouia sur la plateforme GAMA	170
7.9	Synthèse et discussion	176
1	Bilan	177
1.1	Synthèse et positionnement	177
1.2	Contributions scientifiques	178
2	Discussion	180
3	Coupling4modeling et directions futures	181

7.1 Introduction

L'activité de modélisation et de simulation dans son ensemble consiste tout d'abord à concevoir un modèle. Ensuite il est nécessaire de simuler ce dernier pour obtenir des résultats. Le simulateur développé pour ce cas d'étude permettra de tester les outils méthodologiques, conceptuels et logiciels mis en place durant la thèse. Dans ce chapitre l'approche Coupling4modeling va être appliquée à la problématique d'aménagement de cette ville. Nous explicitons dans ce qui suit comment notre approche permettra d'associer des modèles pour voir comment se déploie la ville. L'étude de l'évolution d'une ville consiste à étudier [Pae72] sa population, les comportements de ses résidents, ses activités économiques, les contraintes relatives aux structures spatiales, ainsi que les actions et les décisions des pouvoirs politiques responsables du futur de la ville. L'évolution de ses différentes composantes (géographiques, sociales et économiques) est décrite par des processus dont les interactions constituent la dynamique urbaine de la ville de Métouia.

Ce travail est réalisé en collaboration avec une équipe de géomètres et d'urbanistes impliqués dans la politique d'aménagement de la ville de Métouia. Le cas d'étude de Métouia présente de multiples avantages : (i) il est choisi suite à une demande identifiée de la municipalité si bien qu'une équipe de thématiciens géographes et de chercheurs en informatique s'investiront dans ce projet ; (ii) la question thématique est clairement définie ; (iii) il existe une multitude de modèles et de simulateurs connexes au domaine abordé qui pourront être réutilisés et couplés pour répondre à la problématique de l'agglomération de Métouia.

Comme indiqué précédemment, un phénomène peut être représenté par différents modèles, de résolutions différentes, chacun d'eux étant adapté à des circonstances particulières de la simulation. Dans ce chapitre, nous présentons les modèles existants choisis pour modéliser le système urbain de la ville de Métouia et ses spécificités. En effet, dans le contexte de notre cas d'étude, nous remarquons que ces modèles ne sont pas suffisants s'ils sont pris séparément. Ainsi nous proposons d'utiliser la méthodologie et le métamodèle de couplage Coupling4modeling pour avoir une meilleure vue sur la problématique d'aménagement de la ville de Métouia.

Le modèle de couplage conçu pour la ville de Métouia est développé sur la plateforme de simulation GAMA et appliqué à des données réelles de la ville stockées dans un système d'information géographique. En testant différents scénarios prospectifs, l'approche de couplage Coupling4modeling permet ainsi d'observer en quoi la répartition de la population, les politiques d'urbanisation ou l'évolution économique influeront sur l'image qu'aura demain l'espace de la ville de Métouia.

7.2 Contexte du projet

Le contexte de recherche général de ce cas d'étude sur lequel on applique notre approche Coupling4modeling concerne la simulation urbaine qui fait partie du champ de la géosimulation. En effet, la géosimulation [San04] a pour but de simuler le comportement des systèmes spatiaux en regroupant un ensemble de concepts et de méthodes associées qui combinent les sciences de l'information géographique avec les champs de l'intelligence artificielle. Ce qui fait de ce cas d'étude un exemple particulièrement adapté à notre approche de couplage de modèles hétérogènes et multi-échelles.

En effet, un appel d'offre a été lancé pour la révision du Plan d'Aménagement Urbain (PAU) actuel afin de remédier à un ensemble de problèmes et répondre aux nouveaux besoins de la ville. Ce PAU est réalisé dans le cadre d'un programme futur d'aménagement de l'espace urbain de la

ville de Métouia (Tunisie) qui souhaiterait réaliser une étude expérimentant différents scénarios d'urbanisme en prenant en considération les aspects suivants :

- La nouvelle démographie de la ville (augmentation du nombre d'habitants, densité de chaque zone de la ville, le retour des retraités à leur ville d'origine, migration des habitants des régions proches, départ de certains autres, etc) ;
- Les éventuelles extensions urbaines de la ville pour répondre aux besoins de logements (les nouvelles dimensions de chaque zone de la ville, la mobilité résidentielle des habitants, les réaménagements de certaines zones telles que la zone maritime, l'oasis, etc) ;
- Les nouveaux grands projets industriels et économiques prévus pour la ville (ajout d'une nouvelle zone industrielle, ré-exploitation agricole de l'oasis en partie abandonné, exploitation des eaux géothermiques, l'extension de la zone industrielle absorbera davantage de cadres et de main d'œuvre de la commune, la réalisation de la zone touristique de chat el Hamrouni, etc) ;
- La nouvelle mobilité générée au sein de la ville suite aux dynamismes provoqués par les projets précités. La nouvelle infrastructure de la ville (infrastructure routière, prolongement de l'autoroute Sfax-Gabès, réseaux d'électricité, réseaux hydrauliques, réseaux téléphoniques, etc) ;
- L'augmentation de la capacité des sites universitaire ainsi que la programmation d'un campus universitaire à Bouchamma qui affectera directement l'espace de la commune.

Afin de répondre à cette vision de la ville décrite ci-dessus nous allons choisir des modèles de la littérature qui soient proches du contexte de la ville de Métouia. Dans ce qui suit, nous allons suivre les six phases de la méthodologie de couplage présentée précédemment (cf. section 5.4 page 111) afin d'assurer le couplage des modèles de la ville de Métouia.

7.3 Analyse des modèles et de l'environnement de la ville de Métouia

Il s'agit de la première phase qui consiste à sélectionner les modèles à coupler pour représenter le système complexe spatial de la ville de Métouia. Pléthore de modèles existent et couvrent les problèmes d'urbanisme soulevés par la ville de Métouia (cf. section 2.5 page 33). Chacun de ces modèles aborde une partie de la problématique sans répondre à l'ensemble des besoins en termes de modélisation-simulation pour ce projet d'aménagement. La solution que nous proposons dans le cadre de cette thèse, serait de concevoir et de développer un nouveau modèle et un nouveau simulateur représentatif du système complexe qu'est la ville de Métouia. Pour cela, nous comptons utiliser l'approche de couplage Coupling4modeling afin de ré-exploiter des modèles existants, capitalisés dans des études antérieures.

Ainsi, dans le cadre de ce projet, nous avons choisi de coupler un modèle démographique de [HF09] avec un modèle d'occupation du sol *GeOpenSim* [PCGR10a] et un modèle économique *CityDEV* [SAAG03]. Nous avons choisi de nous limiter à ces trois modèles en omettant d'ajouter un modèle de transport étant donné que les transformations prévus pour l'infrastructure routière de la ville sont négligeables. Ces modèles constituent pour nous les meilleurs choix pour la modélisation de la problématique de l'aménagement en raison de leur clarté, de leurs résultats et de leur domaine d'application initial. Nous entamons dans cette section, la première phase de notre méthodologie de couplage qui consiste à analyser les modèles et l'environnement de la ville afin d'identifier leurs échelles, leurs entrées et sorties afin de comprendre comment les coupler.

7.3.1 Modèle de croissance démographique

Comme indiqué précédemment dans (cf. section 2.5.1 page 34), les modèles démographiques cherchent généralement à prédire l'évolution de la population et estimer la variance des taux démographiques comme les taux de natalité, de mortalité, d'attractivité de la ville, etc. Dans notre cas d'étude, nous allons prendre le modèle démographique de [HF09] utilisé par le ministère des équipements Tunisien et le bureau d'études Architecture, Urbanisme, Décoration et Aménagement (AUDAce) qui travaille sur l'élaboration du PAU de Métouia. En plus de sa simplicité, ce modèle se caractérise par son adéquation au contexte urbain des petites villes Tunisiennes où le développement de la population dépend essentiellement d'un taux de croissance et d'un taux d'attractivité variables [PPK06]. Dans ce modèle le calcul de la population peut s'effectuer par l'équation suivante :

Équation de calcul de la future population de la ville

$$P_n = P_{n-1} (1 + \tau_n + \Gamma_n)$$

Avec

- P_{n-1} : population à la date $n-1$;
- P_n : population à la date n ;
- τ_n : taux d'évolution de la population entre les dates n et $n-1$;
- Γ_n : le taux d'attractivité de la ville dépendant des offres d'emplois offerts par la ville.

Nous nous intéressons par la suite aux sorties qui doivent être spatialisées et échangées avec les autres modèles de la ville à chaque itération du modèle. Nous allons donc utiliser l'équation du modèle pour calculer uniquement le différentiel entre la future population de la ville et la population actuelle à chaque itération. Ainsi, la sortie du modèle sera la population δ_{P_n} qui correspond à la nouvelle population à loger. Ce différentiel de la population δ_{P_n} sera calculé conformément à l'équation suivante :

Équation de calcul du différentiel de la population à la date n

$$\delta_{P_n} = P_{n-1} * (\tau_n + \Gamma_n)$$

Avec

- δ_{P_n} : différentiel de la population entre la date n et la date $n-1$;
- P_{n-1} : population à la date $n-1$;
- τ_n : le taux d'évolution de la population à la date n ;
- Γ_n : le taux d'attractivité de la ville à la date n .

Les paramètres du modèle seront déduits à partir de l'historique de la ville. L'ensemble des données statistiques collectées sur la ville [INS04] nous permettra de déduire la valeur des paramètres d'entrée du modèle démographique qui a pour but de calculer la nouvelle population de la ville P_n en fonction de la population P_{n-1} qui sera collectée quant à elle à partir de l'espace. En effet, à chaque révision du PAU (10 ans selon la législation Tunisienne) ces taux doivent être révisés et ressaisis par l'urbaniste en prenant en considération les nouvelles statistiques sur la ville. La méthodologie adoptée dans les projections démographiques tient compte des tendances observées dans le passé en matière de croissance démographique, mais aussi des perspectives de développement économique.

Le taux d'évolution de la population τ_n est fondé sur l'hypothèse d'un taux de croissance annuel élevé semblable à celui enregistré au cours de la période allant de 1984 à 1989 qui est de

Type du modèle	Entrées	Sorties	Formalisme	Échelle spatiale	Échelle temporelle
Modèle démographique [HF09]	Population actuelle de la ville P_{n-1}	Population additionnelle $\Delta_{(P_n, P_{n-1})}$	Équation mathématique	Espace urbain total de la ville	Pas de temps discret égal à une année

TABLE 7.1 – Fiche descriptive du modèle démographique

4,66% par an durant les dix ans d’application du PAU de la ville. Cela sera relié entre autres à l’essor économique direct ou indirect que connaîtra la commune de Métouia dans les domaines de l’industrie et du tourisme.

Concernant le second taux de l’équation du modèle démographique à savoir le taux d’attractivité de la ville Γ_n on va la calculer en fonction du solde migratoire de la ville par rapport à la population totale de la ville. Ce solde entre 1999 à 2004 est pratiquement négligeable estimé à 0.29% lors des dix années de l’application du PAU. Ce modèle sera résumé dans la fiche descriptive (Tab. 7.1).

Pour pouvoir loger cette population calculée par le modèle démographique, il est nécessaire d’utiliser un modèle capable de représenter les implications spatiales de l’accroissement démographique de la ville. Dans ce qui suit nous présentons le second modèle qui sera utilisé pour la modélisation de la problématique d’aménagement de la ville de Métouia à savoir le modèle d’occupation du sol.

7.3.2 Modèle d’occupation du sol

Les modèles d’occupation du sol (cf. section 2.5.4 page 41), ont pour but de simuler l’évolution et l’étalement des villes en se basant sur les lois qui gouvernent leurs dynamiques urbaines. Dans notre cas d’étude, nous allons utiliser le modèle d’occupation du sol GeOpenSim [PCGR10a] pour densifier dans un premier temps les parcelles résidentielles existantes. Une fois que la ville est saturée, ce modèle permettra de créer de nouveaux espaces pour loger la population et les projets d’ordre économique de la ville.

Ce modèle prend en considération la densité des parcelles résidentielles de la ville, les contraintes spatiales de l’espace et la nouvelle densité à atteindre ce qui le rend adapté au contexte d’aménagement de la ville de Métouia. Comme présenté précédemment (cf. section 2.5.4 page 41), le modèle GeOpenSim [PCGR10a] est basé sur une hiérarchie d’agents topographiques (i.e. bâtiments, parcelles, routes, rivières, etc) dont le comportement est contrôlé par un ensemble de règles et d’actions associées spécifiées par l’utilisateur du modèle.

Règle de densification de la ville

On suppose que dv_t est la densité de la ville à un instant t , qui correspond au nombre de logements dans son périmètre urbain.

Sa nouvelle densité dv_{tn} à l’année n sera égale à :

$$dv_{tn} = dv_t + \Delta_n$$

La densité additionnelle à prévoir pour la ville Δ_n sera donc égale au nombre de logements à créer pour loger la population additionnelle dans le périmètre urbain de la ville. Ainsi le nombre Δ_n sera calculé selon la formule suivante :

$$\Delta_n = \theta_{log} * \text{nbrlog}_{n-1}$$

Ce taux d'accroissement des logements θ_{log} sera égal à 1,94% (taux moyen d'accroissement observé tout au long de la période allant de 1994 à 2004).

Règle de densification des blocs

La densité additionnelle à prévoir pour la ville Δ_n sera répartie entre les blocs selon leurs capacités de densification. On distingue une forte capacité de densification principalement dans le 3ème et le 4ème bloc à savoir les développements récents et la zone centrale [HF09].

Si on suppose que \mathbf{db}_t est la densité actuelle du bloc, \mathbf{db}_{tn} la future densité du bloc et β la densité supplémentaire à ajouter au bloc on aura la règle d'évolution suivante :

$$\mathbf{db}_{tn} = \mathbf{db}_t + \beta$$

Cette densité calculée pour chaque bloc sera divisée sur les différentes parcelles de type résidentiel selon l'espace disponible et les règlements de chaque type de parcelle. Comme cette densification peut être horizontale ou verticale, nous allons utiliser les règles d'évolution suivantes pour les parcelles de type résidentiel :

Règle de densification verticale des parcelles résidentielles

Si $\mathbf{H}_p < \mathbf{H}_{p_{max}} / 2$ et $\mathbf{Nbr}_{etaggp} < \mathbf{Nbretagp}_{max}$ alors $\mathbf{dp}_{tn} = \mathbf{dp}_t + 1$

Règle de densification horizontale des parcelles résidentielles

Si $\mathbf{COS}_p < \mathbf{COSp}_{max} / 2$ alors $\mathbf{dp}_{tn} = \mathbf{dp}_t + 1$

Avec

- \mathbf{dp}_{tn} : la densité de la parcelle à la future date t_n ;
- \mathbf{dp}_t : la densité actuelle de la parcelle à la date t ;
- \mathbf{H}_p : la hauteur du bâtiment de la parcelle ;
- $\mathbf{H}_{p_{max}}$: la hauteur maximale selon le règlement d'urbanisme relatif à la parcelle ;
- \mathbf{Nbr}_{etaggp} : le nombre d'étages de l'habitat ;
- $\mathbf{Nbretagp}_{max}$: le nombre maximal d'étages autorisé pour la parcelle ;
- \mathbf{COS}_p : le coefficient d'occupation du sol actuel de la parcelle ;
- \mathbf{COSp}_{max} : le coefficient d'occupation du sol maximal selon le règlement d'urbanisme relatif à la parcelle.

Notons que la règle de densification verticale sera privilégiée à la règle de densification horizontale. Ce processus de densification de la parcelle va continuer jusqu'à atteindre la densité β fixée au préalable pour le bloc ou jusqu'à l'atteinte de la capacité maximale des parcelles du bloc.

S'il s'agit maintenant de parcelle de type industriel la densification sera uniquement de type horizontal étant donné qu'il est rarement possible de superposer des sociétés industrielles verticalement.

Règle de densification horizontale des parcelles industrielles

Si $S_{projet} < S_{tot} - (S_{bat} + 20\% * S_{tot})$ alors $dp_{tn} = dp_t + 1$

Avec

- S_{projet} : la surface du projet industriel ;
- S_{tot} : la surface totale de la zone industrielle ;
- S_{bat} : la surface totale bâtie dans la zone industrielle ;
- dp_{tn} : la densité de la parcelle à la future date t_n ;
- dp_t : la densité actuelle de la parcelle à la date t .

Remarque : nous avons supposé que 20% de la surface totale sera prévue pour la voirie primaire et la desserte.

A chaque nouvelle densification on recalcule la somme des densités obtenues dp_{tn} pour la comparer à la densité à atteindre pour la ville. Ceci a pour but de savoir quand est-ce qu'il faut arrêter le processus de densification. De même la somme des nouvelles densités des blocs est recalculée pour la comparer à la densité de la ville à atteindre.

Si le tissu urbain actuel ne permet pas d'atteindre la densité supplémentaire Δ_n calculée à l'échelle de la ville, il devient indispensable de prévoir l'extension de la ville. Cette extension de la ville va devoir s'effectuer selon des règles d'évolution spécifiques.

Règle d'évolution des parcelles non assignées

Si $S_{pr} < S_{pNA}$ et $O_{pr} = O_{pNA}$ alors $MOS_{pNA} = MOS_{pr}$

Avec

- S_{pr} : la Surface du projet considéré qui peut être résidentiel ou économique ou un équipement public ;
- S_{pNA} : Surface de la parcelle non assignée ;
- O_{pr} : orientation souhaitée pour le projet (sud, Nord, Est, Ouest) ;
- O_{pNA} : orientation de la parcelle non assignée ;
- MOS_{pNA} : nouveau mode d'occupation du sol de la parcelle non assignée ;
- MOS_{pr} : mode d'occupation du sol correspondant au type du projet (résidentiel, industriel, commercial, etc).

Ainsi les différents agents spatiaux de notre modèle disposent de règles qui leur permettent d'évoluer morphologiquement à leurs propres façons. Ces règles d'évolution sont déduites en comparant l'évolution des objets spatiaux considérés par le passé dans les bases de données géographiques qui représentent la ville à des dates différentes. Dans notre cas d'étude, ces règles doivent également prendre en considération un ensemble de contraintes réglementaires imposés par le ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire Tunisien.

Nous allons donc appliquer les règles d'évolution (cf. section 2.5.4 page 41) de la ville, des blocs (îlots) et des parcelles aux données géographiques de la ville de Métouia. Ce modèle aura la fiche descriptive suivante (Tab. 7.2). Néanmoins, en plus de l'habitation, ce modèle doit prévoir les besoins en espaces pour les projets économiques qui feront l'objet du troisième modèle choisi pour la ville.

7.3.3 Modèle économique

Les modèles économiques (cf. section 2.5.2 page 37) ont pour but de dégager les différents bassins d'activité, le nombre d'emplois existants et à créer, les projets prévus pour le développement des activités économiques et leurs implications sur l'environnement socio-économique.

Type du modèle	Entrées	Sorties	Formalisme	Échelle spatiale	Échelle temporelle
Modèle d'occupation du sol GeO-openSim [PCGR10a]	Densité Δ_n , taux τ_n , Nbr de blocs, orientation, projets, capacité parcellle, densité parcellle	\mathbf{dp}_{tn} , \mathbf{MOS}_p	Système multi-agents	Parcelle	Pas de temps égal à dix ans

TABLE 7.2 – Fiche descriptive du modèle d'occupation du sol avec Δ_n nombre de logements à créer pour loger la population additionnelle, θ_{log} taux d'accroissement des logements, \mathbf{dp}_{tn} la densité de la parcellle à la future date t_n , \mathbf{MOS}_p le mode d'occupation de la nouvelle parcellle

Dans notre cas d'étude, nous avons choisi le modèle multi-agents CityDEV [SAAG03] (présenté précédemment dans (cf. section 2.5.2 page 37) pour modéliser l'activité économique de la ville de Métouia. Ce choix revient au fait que ce modèle de part sa simplicité est très proche du contexte de la ville de Métouia.

En effet les agents du modèle représentent le secteur de base (les industries), le secteur des services (les entreprises commerciales, les services privés et publics) qui constituent tous les deux les principaux secteurs d'activités de la ville de Métouia. Nous disposons également de la majorité des données dont le modèle a besoin pour s'exécuter à savoir : la main d'œuvre disponible, les projets existants et prévus dans ces principaux secteurs d'activité de la ville, etc. Par ailleurs, ce modèle produit des données faciles à spatialiser à savoir les bâtiments nécessaires pour répondre aux nouveaux besoins des agents intervenant dans les activités économiques de la ville. Ce modèle SMA se base sur un ensemble de relations entre les agents et les biens dont ils ont besoin pour assurer leurs activités économiques (cf. section 2.5.2 page 37). En utilisant ce modèle nous devons donc définir les agents de chaque type (famille, entreprise industrielle, entreprise commerciale, services privés, services publics, promoteur immobilier). Par la suite, il faut définir les besoins et les produits de ces agents en termes d'unités comme l'indique le tableau suivant (Tab. 7.3).

Ainsi la saisie des nouveaux projets prévus pour la ville se fera conformément à ce tableau où les "In" signifient que ce bien est utilisé comme une entrée par l'agent et les "Out" signifient que le bien est produit ou fourni par l'agent. Ces "In" et "Out" seront remplacés par un nombre estimatif des unités consommées ou produites par l'agent lors de la construction du graphe d'interactions des agents impliqués dans les activités économiques de la ville de Métouia. Les agents deviennent ainsi capables d'interagir en utilisant cette schématique où les besoins de certains agents deviennent les produits des autres. Comme pour tous les modèles de la ville il est important d'étudier le tissu économique existant de la ville pour pouvoir exécuter le modèle CityDEV [SAAG03]. En effet, les données dont nous disposons sur la ville nous permettent de créer des agents au nombre des différents projets existants de la ville. Nous recensons dans ce qui suit les principales activités de la ville.

Les entrées du modèle seront les projets économiques prévus pour la ville et la population active de la ville. L'exécution du modèle se déclenche à chaque pas de temps qui débute par l'ajout de nouveaux projets. Suite à son exécution le modèle produit le nombre d'emplois et

Biens	Agents	Ménage	Entr indus	Entr comm	Entr serv priv	Serv pub	Prom immob
Parcelle	-	-	-	-	-	-	In
Main d'œuvre	Out	In	In	In	In	In	In
Bâtiments	In	In	In	In	In	In	Out
Produits d'exportation	-	Out	-	-	-	-	-
Services publics	In	-	-	-	-	Out	-
Services publics	In	-	-	-	-	Out	-
Services privés	-	In	In	Out	-	-	-
Les matières premières pour l'industrie	-	In	-	-	-	-	-
Matières premières pour la construction	-	-	-	-	-	-	In
Marchandises en gros	-	-	In	-	-	-	-

TABLE 7.3 – Les relations entre les agents et les biens, source : [SAAG03], légende : Entr indus : Entreprises industrielles ; Entr comm : Entreprises commerciales ; Entr serv priv : Entreprises de services privés ; Serv pub : Services publics ; Prom immob : Promoteurs immobiliers

Type du modèle	Entrées	Sorties	Formalisme	Échelle spatiale	Échelle temporelle
Modèle économique CityDEV [SAAG03]	Projets, population active	Emplois, bâtiments	système multi-agents	Ville	Pas de temps discret égal à cinq ans

TABLE 7.4 – Fiche descriptive du modèle économique

les bâtiments nécessaires aux activités économiques de la ville. Ce modèle aura donc la fiche descriptive suivante (Tab. 7.4). Selon les phases de la méthodologie de notre approche de couplage Coupling4modeling, il est nécessaire suite à l'analyse des modèles à coupler de spécifier les caractéristiques (composants, échelles, etc) de l'espace urbain de la ville.

7.3.4 L'espace urbain de la ville

L'espace de la ville sera représenté sous la forme d'un système géographique qui nous a été délivré par les localités de la ville de Métouia et auquel on a ajouté les données spatiales dont nous disposons sur la ville. Ce choix nous permet de tirer partie de la finesse des représentations spatiales vectorielles pour décrire des processus géométriques complexes tels que la ville. En effet, ce système d'information géographique permet de regrouper les éléments construits de la ville à plusieurs échelles d'observation (parcelle, bloc, zone, etc), les équipements publics, les routes ainsi que les éléments naturels (zones agricoles, parc, jardins publics, etc). Dans ce qui suit nous allons détailler les composantes de cet espace géographique. Le paysage urbain de la commune de Métouia est constituée des deux agglomérations d'El Aouinet et de Metouia centre, elle-même composée de constellation de quartiers distincts [HF09] :

- Le noyau ancien : c'est le centre proprement dit de la commune situé à l'Ouest regroupant les activités principales tel que : la Commune, un bureau de poste et une mosquée. La grande partie est composée de logements traditionnels du type médina (où les pièces ouvrent sur un patio intérieur) avec une très faible proportion de Villas et une opération immobilière du type en bande exécutée durant les années 80 ;
- Les quartiers d'habitat social planifié : il s'agit d'opérations d'habitat réalisées par des promoteurs publics, présentant un tissu dense du type groupé (édifiées sur un même lotissement) ou en bande continue (juxtaposées et de conception analogue), une trame régulière et des parcelles de petite taille ;
- Les développements récents : il s'agit de la zone Est de la commune constitué essentiellement d'un tissu urbain qui se caractérise par un tracé orthogonal avec des voies structurantes de direction Est-ouest, reliant la RN1 à la palmeraie. La typologie dominante est celle de logements traditionnels à patio ;
- La zone centrale : c'est la partie qui s'est développée entre les deux entités de Metouia ; El Maya et le noyau ancien sur le long de la route nationale RN15 et sur la rive Sud ; la rive Nord est occupée par la palmeraie. Dans cette zone se situe également un centre administratif qui s'est développé suite à l'édification d'un certain nombre d'équipements.

En tenant compte de cette brève présentation de l'aspect global de la commune de Métouia, l'analyse de la morphologie urbaine permettra dans un second temps de distinguer les différents

Table UPa2	Table UAa1	Table UBa	Table UBB	Table UIa	Table NAA
Libellé = Parcelles à habitat de type médina (noyaux anciens), COSmax = 0,75, Hmax=8m (R+1), CUF- max=1,4	Libellé = Parcelles à habitat individuel de type isolé, D= 25 log/hectare, COS=0,50, Hmax=12m (R+2), CUF- max=0,90	Libellé = Parcelles à immeubles polyfonctionnels COS=0,8, Hmax=12m (R+2), CUF- max=2,8	Libellé = Équipements publics (ministériels, collectivités publiques et locales, et établissements publics)	Libellé = Zone à petits métiers et artisanal COS=0,7, Hmax=12m (R+2), CUF- max=1,8	Libellé = Parcelles agricoles

TABLE 7.5 – Extrait du système d'information géographique de la ville de Métouia. Légende : COS : Coefficient maximale d'occupation du sol, Hmax : hauteur maximale, CUFmax : Coefficient maximale d'utilisation foncière, D : densité maximale de la parcelle exprimée en nombre de logements par hectare

tissus, leur répartition spatiale et leur caractéristiques respectives. On présente dans le tableau suivant (Tab. 7.5), un extrait du SIG de la ville de Métouia en se basant sur le découpage du tissu urbain de la ville [HF09].

Cette description de l'environnement nous permet de déduire que l'échelle spatiale de l'environnement qui représente la ville est la parcelle. Cette parcelle appartient à un bloc, qui appartient lui-même à une agglomération (ou zone) de la ville. Ainsi le modèle économique et le modèle démographique doivent prévoir un certain nombre d'opérations pour gérer leurs différences d'échelles par rapport à l'échelle de l'environnement. Tandis que le modèle d'occupation du sol évolue à la même échelle que l'espace. La deuxième phase de l'approche de couplage consiste à construire la base de connaissances qui sera présentée dans la section suivante.

7.4 Construction de la base de connaissances spatiales de Métouia

Comme cela a été décrit dans les phases de la méthodologie de couplage, il est nécessaire de construire une base de connaissances qui permet d'interpréter les données non spatiales des modèles à coupler. Pour construire cette base de connaissances, nous nous basons sur la grille des équipements et le guide de programmation des équipements socio-collectifs fournis par les urbanistes [MEH97]. Le recours à ces deux documents permet de calculer le nombre d'équipements nécessaires selon des seuils quantitatifs d'apparition variant de moins de 1000 à plus de 60000 habitants tandis que les normes appliquées seront calculées en m² par logement.

Nous présentons une partie de la base de connaissances construite pour l'interprétation spatiale des données dans le tableau (Tab. 7.6). D'après ce tableau, il nous sera possible de calculer, en plus des équipements, les surfaces foncières à bâtrir selon les seuils de ménages et de populations définis.

Nous pouvons déduire à partir de cette base de connaissances que l'augmentation de la population engendre l'augmentation des parcelles résidentielles ainsi que les surfaces créées pour d'autres usages (se déplacer, consommer, se distraire, travailler, etc). Dans ce qui suit nous proposons d'étudier avec plus de détails la corrélation entre les modèles de la ville.

7.5 Corrélation des modèles de la ville de Métouia via l'espace

Il s'agit de la troisième phase de notre méthodologie de couplage qui cherche à lier des modèles qui ne sont pas forcément conçus pour être couplés ensemble. En partant des fiches descriptives des différents modèles présentées dans la phase de l'analyse des modèles, nous identifions les entrées et les sorties à caractère spatial qui seront partagées entre les différents modèles. L'ensemble des entrées, des sorties et des relations entre modèles formera ce qu'on a appelé précédemment le graphe de dépendance. D'après ce graphe de dépendance (Fig. 7.1), on peut déduire que les

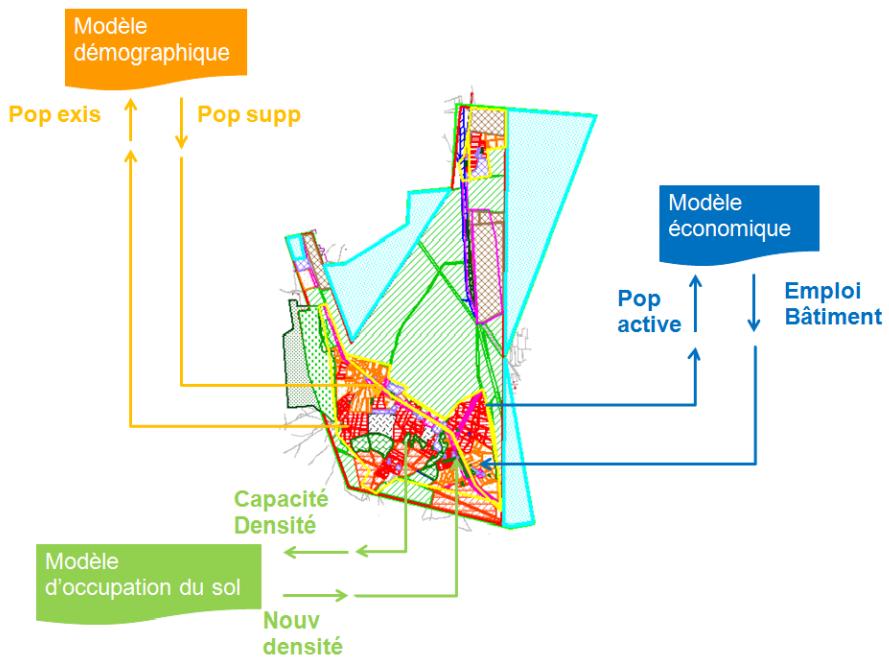


FIGURE 7.1 – Le graphe de dépendance de la ville de Métouia

modèles échangent leurs données via l'espace, qui est le facteur de couplage.

Ainsi le modèle démographique récupère la population existante dans la ville pour pouvoir calculer la population additionnelle à loger dans les parcelles résidentielles de la ville. D'un autre côté, le modèle d'occupation du sol récupère la capacité et la densité (qui s'exprime en nombre de logements) à partir de l'espace afin de calculer la nouvelle densité à fournir pour les autres modèles de la ville. La population, et plus particulièrement la population active, sera également récupérée par le modèle économique pour connaître la main d'œuvre disponible au sein de la ville. Une fois le graphe de dépendance établi, on entame dans la section suivante la phase de la conception du modèle couplé représentant la ville de Métouia.

7.5. Corrélation des modèles de la ville de Métouia via l'espace

Secteur	Equipement	Seuil ou condition d'apparition	Surface foncière unitaire (m2)	Localisation préférentielle	Surface bâtie (m2)	Normes de stationnement interne	Observations
		Logements	Population	Tissu faible densité	Tissu forte densité		
Enseignement	Ecole primaire de base (10 salles)	900 à 1000	4500 à 5000	3000 à 5000	1000 à 3000	En bordure de voirie	600 à 800
	Collège (12 salles)	1800 à 2000	9000 à 10000 noyau de 6 salles	5000 à 10000	3000 à 5000	En bordure de voirie	1000 à 1200
	Lycée (1000 élèves)	3600 à 4000	18000 à 20000 noyau de 700 élèves	10000 à 20000	5000 à 10000	En bordure de voirie	1500 à 2500
Santé	Centre de santé de base type II	500	2500	1500	1000	Proche du noyau central	200 à 300
	Hôpital régional (250 lits)		Chef lieu de gouvernorat	25000	15000	Proche d'un acces rapide	500 à 1000
Espaces verts et de loisirs	jardin public	1000	5000	3 m2 par habitant	2.5 m2 par habitant	Proche des écoles primaires	5% de l'entreprise foncière

TABLE 7.6 – Extrait de la grille des équipements socio-collectifs et du guide de programmation du ministère Tunisien des équipements [MEH97].
Légende : les tissus de faible densité : tissus à des typologies de villes, les tissus de forte densité : tissus à des typologies d'immeubles collectifs [MEH97]

7.6 Conception du modèle couplé pour la problématique d'aménagement de Métouia

Nous entamons dans cette phase l'identification des agents nécessaires pour assurer le couplage des modèles choisis pour modéliser la ville de Métouia. Le but est de construire le modèle de couplage dont le comportement global permet de gérer les échanges entre les modèles à différentes échelles spatiales et temporelles. On commence dans cette section par spécifier le rôle de chaque agent dans la hiérarchie organisationnelle définie pour ce modèle de couplage. On se basera par la suite sur les concepts du métamodèle de couplage associé à cette approche pour présenter les classes du modèle de couplage de la ville de Métouia.

7.6.1 Architecture du modèle couplé

Compte tenu des modèles choisis et du SIG de la ville, nous utilisons les concepts de Coupling4Modeling pour proposer une architecture du modèle de Métouia où chaque modèle sera composé des quatre parties définies dans l'architecture organisationnelle hiérarchique précédemment présentées dans la section (cf. section 5.2.3 page 98). Pour des raisons de lisibilité, on va se focaliser sur un seul modèle qui est en l'occurrence le modèle démographique [HF09] afin d'illustrer l'implémentation de l'architecture proposée (cf. section 5.2.3) à travers un cas réel. Par ailleurs, la version complète avec les trois modèles présentée plus tard dans la figure 7.7 de la section 7.8. Ainsi la figure suivante (Fig. 7.2) présente l'architecture organisationnelle et hiérarchique du modèle démographique de Métouia, dans laquelle on peut distinguer les 5 éléments de l'architecture organisationnelle de type holonique proposée dans l'approche Coupling4modeling (cf. section 5.2.3.1 page 98).

- A - *Modèles à coupler (Model Agent – section (B) Fig. 7.2)* : Chacun de ces agents permet d'encapsuler les modèles choisis pour la ville de Métouia. L'agent *Model Agent* chargé d'exécuter le modèle démographique a pour rôle de calculer la population additionnelle en se basant sur le taux d'évolution et le taux d'attractivité propres à la ville ;
- B - *Gestion des échelles spatiales (Collector Agent, Spatialization Agent – section (C) Fig. 7.2)* : les modèles choisis pour la ville reproduisent des dynamiques à différentes échelles spatiales. En effet, si le modèle démographique évolue à l'échelle de la ville. L'espace quant à lui stocke les données à l'échelle de la parcelle. Ainsi pour gérer cette différence d'échelles entre les modèles et l'espace de la ville, nous utiliserons des agents pour la collecte et la spatialisation des données. Plus particulièrement, pour le modèle démographique nous aurons besoin de deux agents de collecte pour assurer la conversion des données collectées à l'échelle des modèles. De même, pour la spatialisation, le modèle aura besoin de deux agents de spatialisation afin de convertir les sorties des modèles à l'échelle de l'espace ;
- C - *Gestion des échelles temporelles (Time Agent, Scheduler Agent – section (D) Fig. 7.2)* : les différentes dynamiques de la ville évoluent à différentes échelles de temps. En effet, si le modèle démographique évolue à un pas de temps discret égal à une année, le modèle d'occupation du sol évolue à un pas de temps discret égal à dix ans et le modèle économique évolue à chaque évènement discret. Pour gérer cette diversité, un agent scheduleur se chargera de l'ordonnancement des futures dates d'exécution des modèles calculées au préalable par les agents temps des modèles. Ainsi chaque date d'exécution sera considérée comme un évènement dont le défilement de la liste ordonnée engendre l'envoi d'une autorisation d'exécution au modèle concerné.

7.6. Conception du modèle couplé pour la problématique d'aménagement de Métouia

D - *L'espace (GIS-section (E) Fig. 7.2)* : est construit à partir du système d'information géographique de la ville de Métouia. Il est composé d'une multitude de couches contenant les parcelles et les autres composantes de la ville. Ainsi chaque parcelle est caractérisée par un ensemble de propriétés comme la capacité, la densité, la population, type, etc. Certaines de ces données vont changer en fonction de l'évolution du modèle de couplage. Ce SIG constitue également le cœur du modèle dans la mesure où il est considéré comme l'espace d'échanges des données entre les modèles couplés. Dans notre cas d'étude cet espace évolue à l'échelle de la parcelle. Cet espace va permettre de coupler des modèles dont le fonctionnement dépend entièrement des données collectées sur la ville ;

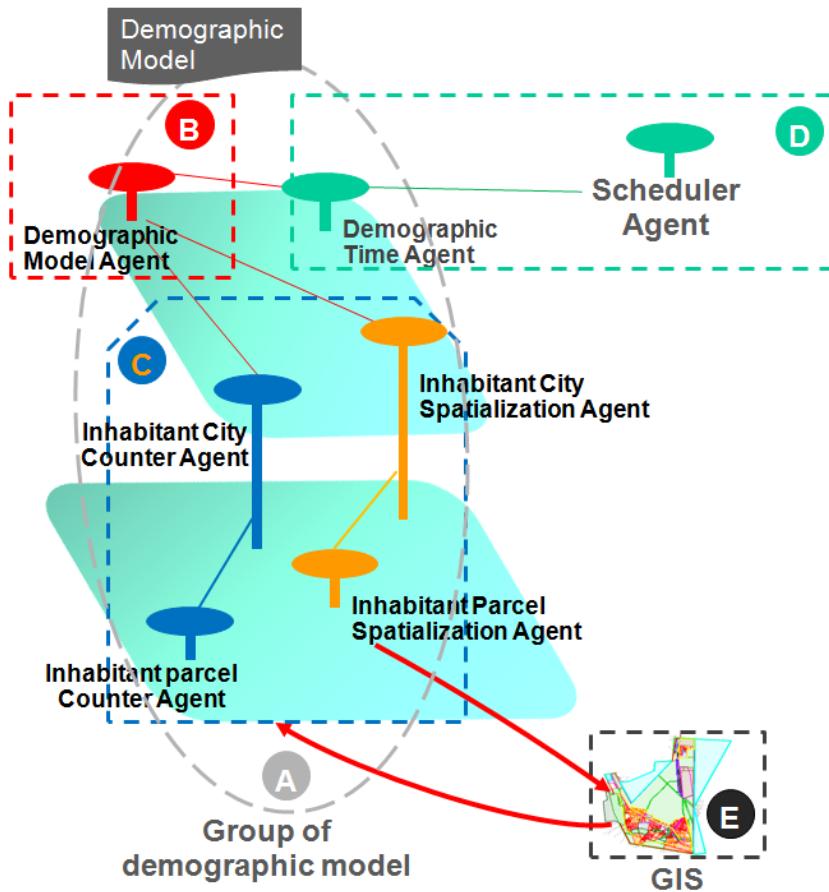


FIGURE 7.2 – L'architecture du modèle démographique de Métouia

Cette architecture ainsi définie sera formalisée dans un diagramme de classes qui sera explicité dans la section suivante.

7.6.2 Les classes du modèle de Métouia

L'instanciation du métamodèle défini précédemment a été mise en œuvre dans le diagramme de classes suivant (Fig. 7.3) :

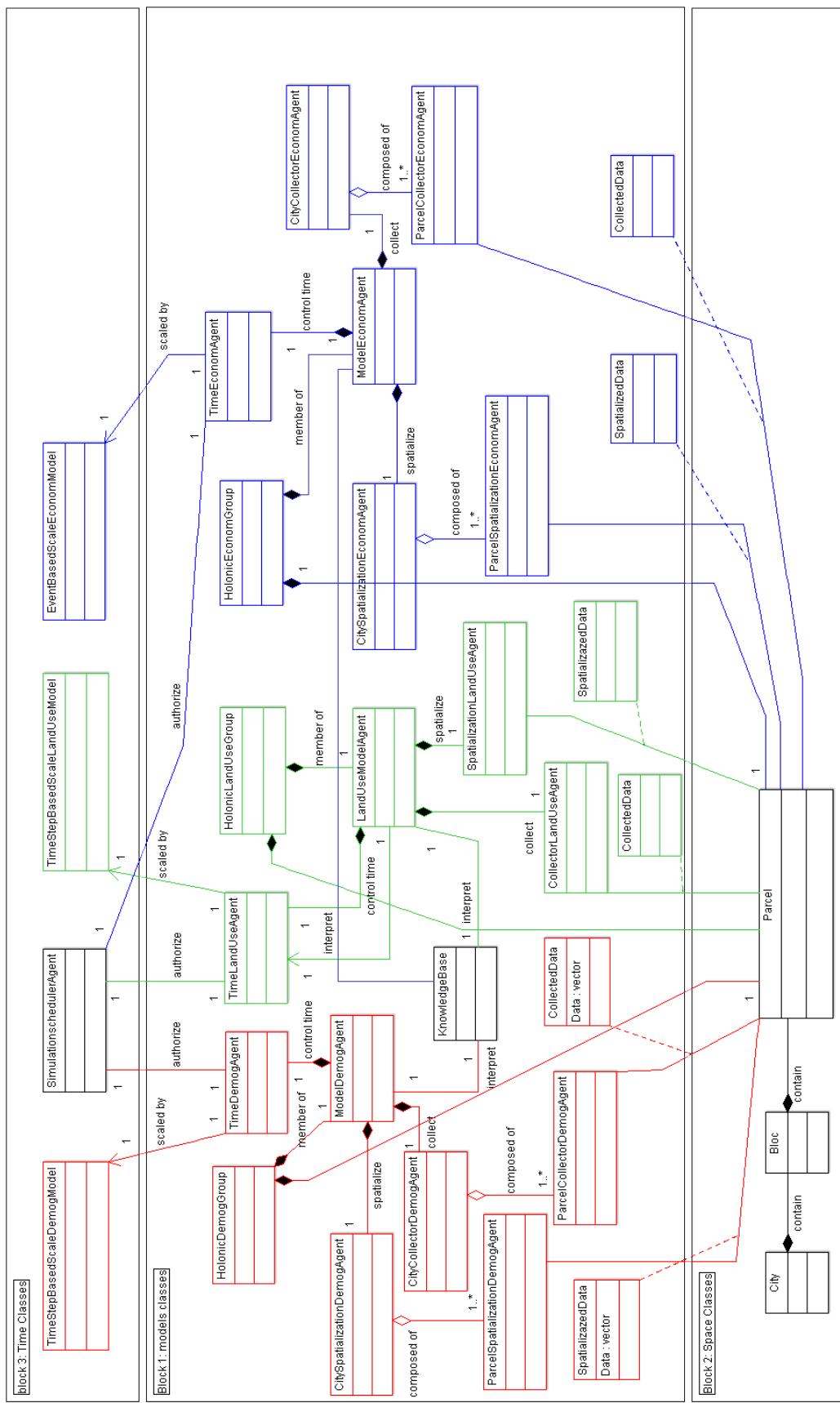


FIGURE 7.3 – Diagramme de classes de la ville de Métouia

Dans ce diagramme de classes (Fig. 7.3) on peut distinguer trois blocs majeurs :

- **Bloc 1– les classes des modèles** : dans ce premier bloc, on définit les classes relatives aux modèles démographiques, économiques, et d'occupation du sol. Conformément au métamodèle présenté précédemment dans (cf. section 5.3.3 page 107) chaque modèle doit être représenté par un groupe holonique, un agent modèle, un agent collecteur, un agent de spatialisation. En cas de différences d'échelles entre les modèles et l'espace, les agents responsables de la collecte et de la spatialization seront décomposés en sous-holons afin d'effectuer les conversions d'échelles nécessaires. Ce qui justifie le recours aux agents *CityCollectorDemogAgent* et *ParcelCollectorDemogAgent* pour assurer la collecte des données démographiques, aux agents *CitySpatializationDemogAgent* et *ParcelSpatializationDemogAgent* pour assurer la spatialisation des données démographiques. Comme le modèle d'occupation du sol évolue à l'échelle de l'espace (la parcelle) son agent collecteur et son agent de spatialisation n'ont pas été décomposés en sous-holons. Quant au modèle économique qui s'exécute à l'échelle de la ville, ses agents de collecte seront de deux niveaux, l'agent *ParcelCollectorEconomAgent* effectue la collecte à l'échelle de l'espace et l'agent *CityCollectorEconomAgent* convertit les données collectées à l'échelle du modèle. Les données économiques à spatialiser seront récupérées par l'agent *CityCollectorEconomAgent* qui les convertit et les envoie à l'agent *ParcelSpatializationEconomAgent* pour être spatialisées à l'échelle de l'espace ;
- **Bloc 2– les classes de l'espace** : les classes relatives à ce bloc permettent de décomposer l'espace total de la ville en différents blocs qui seront eux même décomposés en parcelles ;
- **Bloc 3– les classes du temps** : Dans le bloc 3, on trouve les classes relatives aux échelles temporelles des modèles ainsi que la classe de l'agent scheduleur qui n'appartient à aucun des groupes d'agents des modèles.

En se basant sur cette architecture et ces diagrammes UML nous allons mettre en place un prototype de simulateur qui permet la réalisation des scénarios d'aménagement demandés pour la ville de Métouia. Ceci dit le passage à l'implémentation sur la plateforme de simulation va nécessiter d'uniformiser les formalismes des modèles afin qu'ils puissent communiquer ensemble sur une plateforme de couplage orientée agent.

7.7 Encapsulation des modèles

Pour que nos modèles puissent communiquer ensemble ils doivent parler le même langage. Dans cette étape, nous allons associer les modèles aux agents *Model Agent* pour pouvoir les encapsuler. Il s'agit dans cette étape de réécrire les modèles en langage agent afin d'unifier les langages et les formalismes des modèles. Plus particulièrement, dans cette étape nous allons développer un modèle de comportement de l'agent basé sur le modèle atomique à coupler et transformer ainsi son formalisme à un formalisme générique compréhensibles par tous les modèles.

Cette opération d'encapsulation consistera aussi à associer respectivement les entrées et les sorties des modèles aux ports d'entrées et de sorties de l'agent *Model Agent*. Ainsi, le modèle démographique basé sur des équations mathématiques sera réécrit en langage agent pour spécifier le comportement de l'agent *Demographic Model Agent* qui va l'encapsuler. Par contre pour le modèle économique et le modèle d'occupation du sol déjà écrit en langage agent, on va se contenter d'encapsuler les modèles dans les agents *Economic Model Agent* et *Landuse Model Agent* en gardant leurs formalismes actuels.

A ce niveau, il devient possible d'implémenter ces modèles sur la plateforme de simulation Gama pour observer les résultats du couplage. L'instrumentation ainsi créée sera éprouvée dans le cadre d'une application thématique visant à faire une étude démographique, socio-économique et d'aménagement de l'espace urbain pour l'agglomération de Métouia. Cette application sera utilisée comme un outil d'aide à la décision pour les urbanistes qui souhaitent élaborer le Plan d'Aménagement Urbain (PAU) de la ville de Métouia.

7.8 Implantation des agents en charge du couplage dans la plateforme GAMA

Cette phase permet de fournir un modèle d'implantation de la solution multi-agents conçue durant les phases précédentes. Il s'agit dans cette dernière phase d'implémenter l'architecture des agents de couplage sur la plateforme de simulation choisie afin de tester le résultat du couplage basé sur le métamodèle de l'approche Coupling4modeling.

Pour cela, nous implantons le modèle de métouia via un programme qui sera exécuté sur une plateforme de simulation. Dans notre cas d'étude, l'implantation de l'architecture de couplage dans un simulateur a pour but de simuler la croissance urbaine de la ville (augmentation de la population et des bâtiments) et de permettre à l'urbaniste de tester des scénarios d'évolution supposés pour la ville dont on peut citer :

- Premier scénario (A) : ce scénario repose sur l'hypothèse du maintien du rythme de croissance annuel enregistré durant la période allant de 1984 à 2004 qui est de 2,3% ;
- Deuxième scénario (B) : il se base sur l'hypothèse d'un accroissement démographique annuel moyen de l'ordre de 3,0% ;
- Troisième scénario (C) : il est fondé sur l'hypothèse d'un taux de croissance annuelle élevé semblable au taux enregistré au cours de la période allant de 1984 à 1989 qui est de 4,66%. Cela sera relié entre autres à l'essor économique direct ou indirect que connaîtra la commune de Métouia dans les domaines de l'industrie et du tourisme ;
- Quatrième scénario (D) : renforcement de la centralité et l'uniformisation du tissu urbain en essayant de recoudre les relations entre les deux agglomérations de la commune pour étoffer l'espace urbain et lui apporter plus de cohérence. Ceci permettra de créer un centre urbain capable de rayonner sur l'ensemble de la commune et favoriser par la suite l'essor et le dynamisme économique de la commune pour faire d'elle un noyau satellite conformément aux orientations du SDA de Gabès ;
- Cinquième scénario (E) : renforcement de l'axialité de la ville. Elle affirme le courant d'extension actuel qui prend la direction Ouest (tendant à rejoindre la commune de Ouedhref) et surtout la direction Sud du côté de la cité El Fankar où un nouveau lycée est en cours de construction limitant ainsi les spéculations foncières éventuelles.

Le modèle de couplage défini pour la ville de Métouia sera implanté sur la plateforme de simulation GAMA choisie pour son adéquation aux simulations géographiques. Les sorties observées prendront trois formes différentes :

- Un changement de couleur pour les parcelles ou les cellules densifiées ;
- Un zoning pour assurer l'extension de la ville ;
- Des courbes pour observer l'évolution de certaines variables relatives aux trois dynamiques choisies (comme la capacité, la population et les emplois de la ville de Métouia, etc).

Il s'agit d'une simulation par événements, où chaque date d'exécution d'un des modèles à coupler est considérée comme un évènement. A chaque exécution, on active l'ensemble des agents relatifs

au modèle ayant obtenu une autorisation d'exécution de la part de l'agent ordonnanceur de la simulation. Nous présentons dans ce qui suit, les résultats observés après la mise en œuvre de notre modèle de couplage sur un simulateur basé sur la plate-forme de simulation GAMA. Nous avons opté pour un plan d'expérimentations qui intègre les niveaux de difficultés par étapes.

- 1ère étape : nous commencerons par intégrer notre approche sur une grille de cellules basée sur le modèle de ville de Christaller [Chr66] en couplant uniquement deux modèles ;
- 2ème étape : nous appliquons par la suite le modèle aux données réelles (le SIG) de la ville de Métouia en couplant les trois modèles identifiés pour la ville.

Ces deux étapes seront décrites et détaillées dans les sections suivantes.

7.8.1 Présentation de la plateforme de simulation GAMA

Comme énoncé précédemment, nous avons implémenté notre modèle sur la plate-forme GAMA [DTG] spécialisée dans les simulations spatiales à base d'agents. Il s'agit d'une plateforme de simulation open-source développée au sein de l'unité UMMISCO/IRD depuis 2007 dans le but de modéliser des agents situés dans un système multi-agents [ACBD09]. Elle permet de développer des agents situés dans un système multi-agents multi-échelles.

Cette plateforme comprend également des outils pour manipuler l'environnement géographique qui peut être décrit avec des données vectorielles à partir d'un SIG [ACBD09]. Ainsi les objets de l'environnement sont considérés comme des agents spatiaux à différentes échelles (par exemple, une parcelle, un quartier ou une ville). La création ou la destruction des modèles à différents niveaux d'abstraction se fait par la création ou la destruction des agents correspondants.

Si nous revenons à nos objectifs de développement d'un simulateur utilisant des agents, qui vise à coupler plusieurs modèles multi-échelles hétérogènes en utilisant l'espace comme facteur de couplage, nous constatons que les caractéristiques ci-dessus de GAMA correspondent parfaitement à ces objectifs et facilitent leur mise en œuvre. Ainsi pour tous ces avantages, nous avons choisi d'implémenter notre modèle de couplage de la ville de Métouia sur la plateforme GAMA. Cette implémentation se fera en plusieurs étapes.

7.8.2 Application du modèle de ville de Christaller sur une grille de cellules

Conformément au plan d'expériences présenté ci-dessus, nous commencerons par nous limiter à l'implémentation de deux modèles pour simuler la dynamique démographique et la dynamique de changement du mode d'occupation du sol.

Ainsi au niveau du simulateur, la ville est assimilée dans un premier temps à une grille de cellules selon la théorie des lieux centraux du modèle Christaller [Chr66]. Ce modèle réduit l'espace géographique à un espace homogène composé de places centrales. Ces places sont organisées selon un cadre hexagonal et possèdent chacune une grande quantité de biens et de services [Chr66]. Cette place centrale offrira ses biens et services à des places centrales de moindre importance, de rang 2, à une distance d [Chr66].

De la même manière ces places B offriront leurs services et biens à des places encore moins importantes [Chr66]. Conformément à ce modèle, notre grille de cellule sera divisée en trois places distinctes. La première place centrale sera réservée aux services et aux activités commerciales de la ville (Fig. 7.4 (a)). La seconde place sera de type résidentiel. La troisième restera, quant à elle, sans vocation particulière pour permettre à la ville de s'étendre. Ainsi les cellules de la grille avec un mode d'occupation résidentiel, commercial ou non assigné auront respectivement une couleur rouge, vert et bleu (Fig. 7.4 (a)). Chaque cellule dispose d'un mode d'occupation bien

défini, une capacité d'hébergement, un certain nombre d'habitants et une capacité maximale à atteindre.

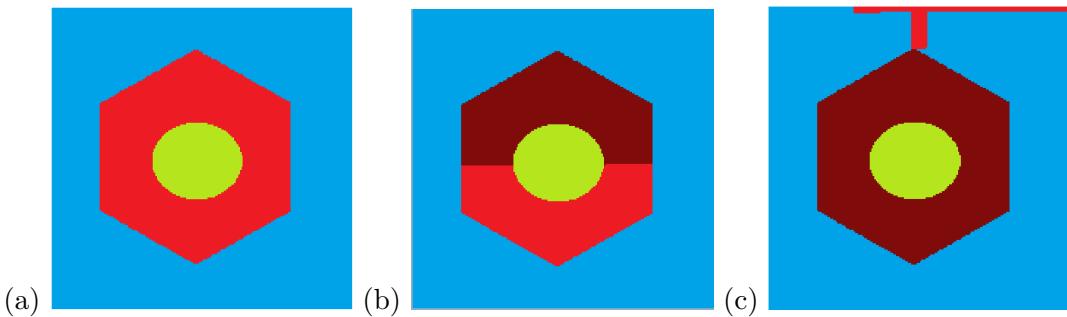


FIGURE 7.4 – La densification progressive de la ville Christaller

Nous avons donc implémenté le modèle démographique (cf. section 7.3.1 page 152) et le modèle d'occupation du sol (cf. section 7.3.2 page 153) qui agissent sur les données démographiques et géographiques du SIG de la ville de Métouia à différentes échelles spatiales. Par ailleurs, dans le modèle d'occupation du sol GeOpenSim [PCGR10a] on définit des règles d'évolution pour la densification des cellules résidentielles et par la suite leur étalement. Ainsi ce modèle tentera tout d'abord de densifier les cellules résidentielles existantes de couleur rouge foncé dans la figure (Fig. 7.4 (b)) via son agent de spatialisation (Fig. 7.7).

Si la ville est saturée (densité maximale atteinte), l'agent de spatialisation (Fig. 7.7) va chercher à créer de nouveaux espaces disponibles pour accueillir la population. L'extension de la ville se fera quant à elle dans les zones non assignées (zones en couleur bleu dans la figure (Fig. 7.4 (c)) dans le périmètre urbain de la ville où on remarque un premier changement de couleur vers le rouge dans certaines cellules. Le modèle choisit les zones proches des zones résidentielles afin de minimiser les coûts d'aménagement et de raccordement aux réseaux (infrastructures, télécommunications, électricité, etc.).

Ce travail est effectué en fonction de la densité et de la capacité des cellules habitées (recueillies depuis l'espace via son agent de collecte (Fig. 7.7)), des contraintes spatiales sur le terrain et la nouvelle densité à atteindre. Pendant ce temps, le modèle démographique doit calculer la nouvelle population en fonction d'un taux de croissance et d'attractivité ainsi que de la population existante (recueillie à partir de l'espace via les agents collecteurs du modèle démographique (Fig. 7.7)). Cette nouvelle population sera placée dans l'espace disponible de la ville (via ses agents de spatialisation (Fig. 7.7)) préparé au préalable par le modèle d'occupation du sol.

Les sorties graphiques du simulateur suivantes permettent d'observer le résultat du couplage sur l'espace. Plus particulièrement, nous avons choisi d'observer l'évolution de certaines données comme : la capacité, l'espace disponible dans les zones résidentielles et la population totale de la ville. Dans la figure (Fig. 7.5 (a)), nous pouvons observer que plus la population augmente (courbe rouge Fig. 7.5 (a)), plus l'espace disponible dans la ville diminue (courbe bleue Fig. 7.5 (a)).

Cela signifie donc que les agents de spatialisation démographiques *Inhabitant City Spatialization Agent* et *Inhabitant Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) sont entraînés de placer la population supplémentaire créée et calculée par le modèle démographique. Plus ces agents placent des habitants au sein des cellules, plus l'espace disponible dans la ville décroît. Notons que la

capacité (le nombre de logements prêts à accueillir les habitants) augmente progressivement jusqu'à atteindre la capacité maximale dans les cellules résidentielles existantes (courbe verte Fig. 7.5 (a)).

D'un autre côté, cela signifie que l'agent modèle de l'aménagement de l'espace urbain *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) est entrain d'augmenter la capacité d'hébergement de la ville. L'agent de spatialisation de l'aménagement de l'espace urbain *Density Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) transforme cette capacité supplémentaire en logements à l'échelle des cellules. Le modèle d'aménagement de l'espace urbain peut ainsi anticiper l'évolution de la population en préparant l'espace nécessaire.

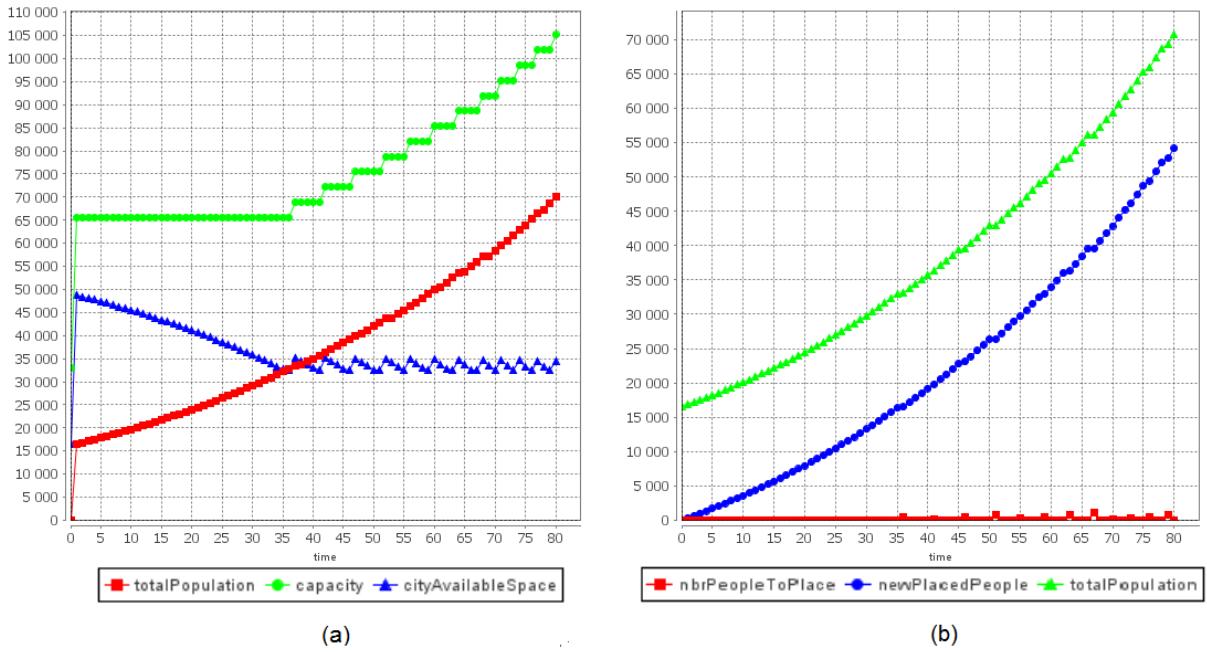


FIGURE 7.5 – Les paramètres observés avant l'extension de la ville : (a) Évolution de la population, la capacité et l'espace disponible au sein de la ville (b) Évolution de la population totale, de la nouvelle population placée et de la population non placée dans la ville

Par ailleurs, la population totale (courbe verte sur la figure (Fig. 7.5 (b))) augmente en fonction de l'augmentation des habitants placés (courbe bleue sur la figure (Fig. 7.5 (b))) et les nouvelles personnes à placer (courbe rouge sur la figure (Fig. 7.5 (b))). Ces données sont recueillies depuis l'espace par les agents collecteurs du modèle. Mais si les agents de spatialisation démographiques *Inhabitant City Spatialization Agent* et *Inhabitant Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) sont en mesure de placer les gens dans les cellules résidentielles, c'est grâce à l'augmentation de l'espace disponible fournie par l'agent interpréteur du modèle d'aménagement de l'espace urbain *Density Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7).

Dans le cas contraire, le nombre des habitants placés n'aurait pas pu augmenter (courbe bleue sur la figure (Fig. 7.5 (b))). Ceci veut dire que le couplage des deux modèles a été fait à travers l'espace. Une fois qu'il n'est plus possible de densifier la ville, le processus d'extension se déclenche ce qui se traduit par un pic au niveau de la capacité d'hébergement de la ville (courbe verte sur la figure (Fig. 7.6 (a))). Ceci permet à l'agent de spatialisation démographique de

continuer à placer la nouvelle population produite par le modèle démographique (courbe bleue sur la figure (Fig. 7.6 (b)). Notre approche nous a donc permis de coupler deux modèles dont le développement et le fonctionnement repose entièrement sur les données recueillies depuis l'espace. Dans la section suivante nous appliquons notre approche de couplage sur les trois modèles choisis pour la ville de Métouia. Par ailleurs, la grille cellulaire sera remplacée par un système d'information géographique stockant les données de la ville de Métouia.

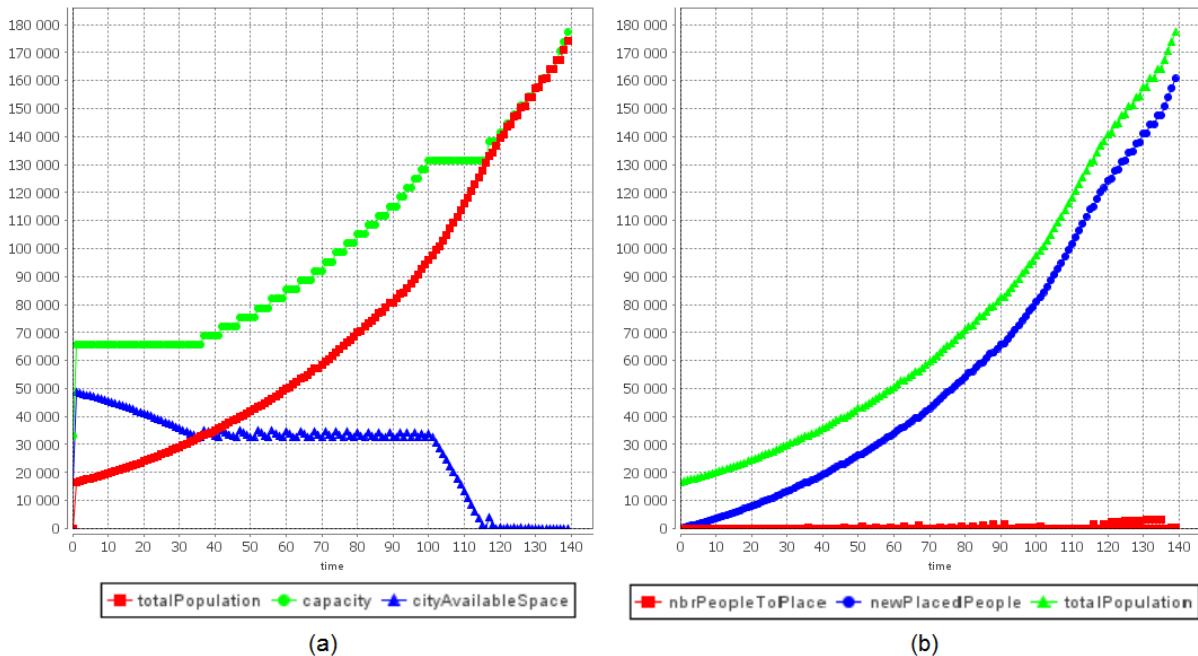


FIGURE 7.6 – Les paramètres observés après l'extension de la ville : (a) Évolution de la population, la capacité et l'espace disponible au sein de la ville (b) Évolution de la population totale, de la nouvelle population placée et de la population non placée dans la ville

7.8.3 Couplage des trois modèles hétérogènes multi-échelles de la ville de Métouia sur la plateforme GAMA

Conformément au plan d'expériences de la simulation définies précédemment, nous ajoutons dans cette section aux deux modèles couplés précédemment (le modèle démographique de [HF09] (cf. section 7.3.1 page 152) et le modèle d'occupation du sol GeOpenSim [PCGR10a] (cf. section 7.3.2 page 153)), le troisième modèle économique CityDEV [SAAG03] (cf. section 7.3.3 page 155) choisis pour la ville. La simulation commence par exécuter le modèle d'occupation du sol afin que celui-ci puisse préparer le terrain destiné aux logements et aux nouveaux projets de la ville. Par la suite, les modèles économiques et démographiques vont pouvoir s'exécuter conformément à leurs échelles temporelles respectives. Nous explicitons dans ce qui suit le fonctionnement global du modèle couplé composé des modèles démographique, économique et d'occupation du sol. Ces trois modèles ont été implémentés sur la plateforme GAMA conformément à cette architecture (Fig. 7.7).

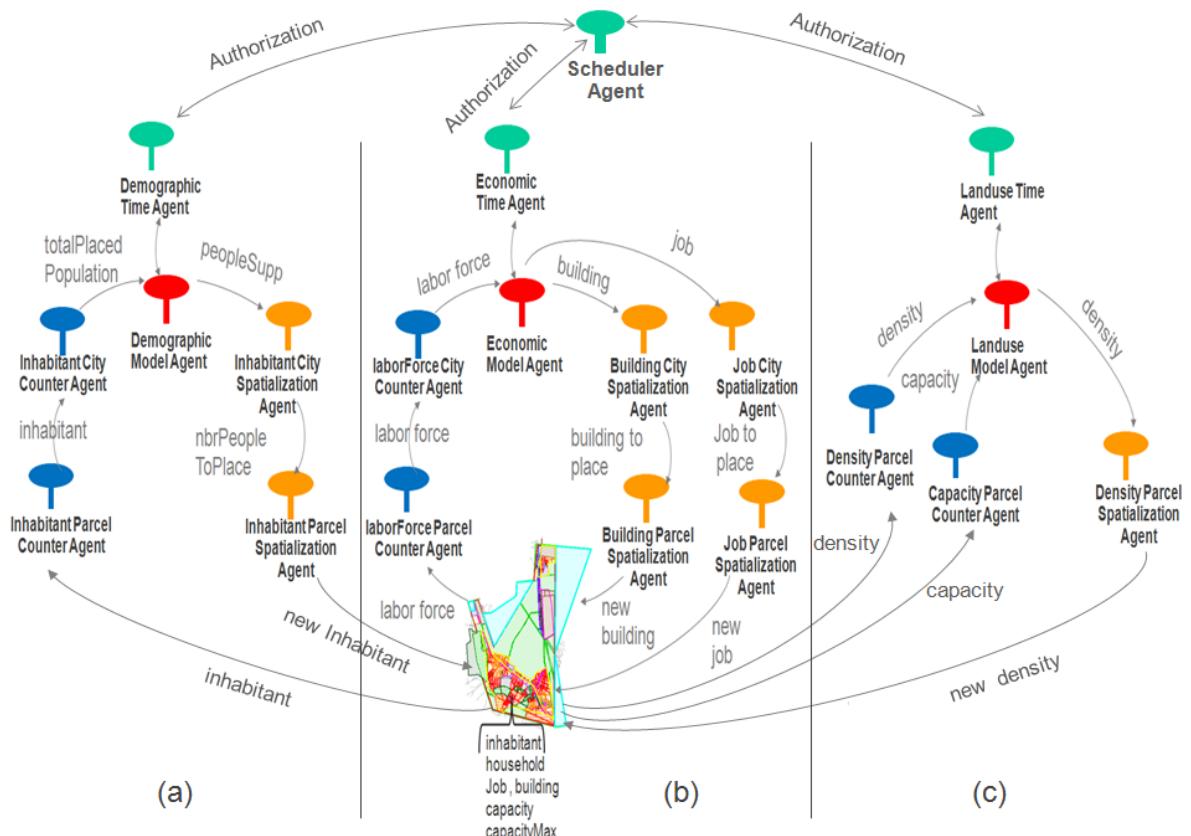


FIGURE 7.7 – Architecture de couplage du modèle démographique de [HF09], du modèle d'occupation du sol GeOpenSim [PCGR10a] et du troisième modèle économique CityDEV [SAAG03] implémentés sur GAMA

Fonctionnement du modèle d'occupation du sol

Comme indiqué précédemment (cf. section 7.3.2 page 153), le modèle d'occupation du sol se base sur le principe de la densification hiérarchique de l'espace. L'agent *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) ne pourra exécuter son modèle qu'après la réception d'une autorisation d'exécution venant de l'agent *Landuse Time Agent* (Fig. 7.7).

Dans un premier temps nous allons nous intéresser aux parcelles à vocation résidentielles. Comme indiqué précédemment (cf. section 7.3.2 page 153), ce modèle cherche à augmenter la densité de la ville. Lors de la première exécution du modèle de couplage, la densité supplémentaire Δ_n sera proposée par l'urbaniste en termes de logements à fournir et ce en fonction des objectifs fixés pour la ville ou en fonction des résultats obtenus de l'ancien PAU. Cette densité sera répartie principalement entre le *bloc 3* et le *bloc 4* à savoir les développements récents et la zone centrale de la ville.

Pour atteindre cette densité dans les deux blocs précités, le modèle doit densifier leurs parcelles. Selon la règle d'évolution de la parcelle (cf. section 7.3.2 page 153) l'agent modèle *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) doit vérifier la capacité de chaque parcelle avant sa densification. Pour avoir ces données, il demande à l'agent collecteur *Capacity Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7) de lui collecter la capacité de la parcelle (c'est à dire son hauteur, son nombre d'étages, son coef-

ficient d'occupation du sol (COS), son hauteur maximale et son COS maximal). Pour pouvoir appliquer la règle d'évolution de la parcelle l'agent modèle *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) a également besoin de connaître sa densité actuelle \mathbf{dp}_t (cf. section 7.3.2 page 153). Cette densité s'exprime en nombre de logements par parcelle.

Par conséquent, il va faire appel à son agent *Density Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7) pour assurer la fonction de collecte du nombre de logements par parcelle. Le même processus de collecte de la densité sera effectué pour les parcelles de type industriel afin de connaître la capacité de chaque parcelle. Pour ce type de parcelle l'agent de collecte *Capacity Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7) se chargera de collecter la surface totale de la parcelle nécessaire au calcul de la règle d'évolution de la parcelle industrielle (cf. section 7.3.2 page 153).

En appliquant ces différentes règles d'évolution l'agent modèle *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) produit une nouvelle densité pour les parcelles existantes densifiables (résidentielles et industrielles). Si la densité supplémentaire Δ_n n'est pas atteinte, l'agent modèle *Landuse Model Agent* applique la règle d'évolution des parcelles non assignées (cf. section 7.3.2 page 153). Grâce à sa base de connaissances, l'agent modèle *Landuse Model Agent* (Fig. 7.7) calcule le nombre d'équipements et d'espaces verts nécessaires en fonction du nombre de logements de la ville.

Il applique par la suite la règle d'évolution des parcelles non assignées pour héberger les différents projets (équipements publics, services publics, espaces verts, etc) prévus ou nécessaires pour la ville. Par la suite, l'agent responsable de la spatialization associé au modèle d'occupation du sol *Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) se charge d'appliquer ces règles au niveau de chaque parcelle afin de densifier les parcelles des blocs identifiés ou créer l'espace supplémentaire nécessaire à l'évolution de la ville.

Fonctionnement du modèle démographique

Comme indiqué précédemment (cf. section 7.3.1 page 152), le modèle démographique calcule la population future de la ville, en fonction du taux d'évolution, du taux d'attractivité de la ville et de sa population actuelle. Une fois que l'agent modèle *Demographic Model Agent* (Fig. 7.7) reçoit une autorisation d'exécution de l'agent *Demographic Time Agent* (Fig. 7.7), l'exécution du modèle peut commencer.

Les taux, indiqués précédemment comme entrées du modèle, seront saisis par l'urbaniste. Par ailleurs, l'agent *Demographic Model Agent* (Fig. 7.7) a besoin de connaître la population actuelle de la ville P_{n-1} (cf. section 7.3.1 page 152) pour effectuer le calcul de la nouvelle population P_n (cf. section 7.3.1 page 152). Cette donnée doit donc être collectée à partir de l'espace par l'agent *Inhabitant Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7). Ce dernier assurera la collecte de la population à l'échelle de la parcelle. Une fois que le calcul de la population supplémentaire δ_{P_n} est fini (cf. section 7.3.1 page 152), l'agent *Inhabitant City Spatialization Agent* (Fig. 7.7) se chargera de la spatialisation de cette donnée.

Fonctionnement du modèle économique

Finalement le modèle économique (cf. section 7.3.3 page 155), a pour but d'intégrer les activités économiques relatives à la ville. Dès la réception d'une autorisation d'exécution de la part de l'agent *Economic Time Agent* (Fig. 7.7), l'agent économique *Economic Model Agent* (Fig. 7.7) entame l'exécution du modèle. Comme indiqué précédemment, cette exécution va nécessiter la saisie des projets par l'urbaniste.

L'agent modèle *Economic Model Agent* aura besoin également de connaître la population active de la ville. Pour assurer la collecte de cette donnée il fera appel à l'agent collecteur *laborForce Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7). Une fois l'exécution finie, l'agent modèle *Economic*

Model Agent produit un nombre d'offres d'emplois pour la population active qui devra être spatialisé par l'agent *Job City Spatialization Agent* (Fig. 7.7). Ceci consiste concrètement à augmenter le nombre de la population active disposant d'un emploi ce qui va augmenter le degrés d'attractivité de la ville. Le nombre d'offres d'emplois sera donc réparti de façon aléatoire sur les parcelles résidentielles où la population active avec emploi va augmenter.

Cette opération permet de corrélérer le modèle démographique avec le modèle économique dans la mesure où l'augmentation de la population active avec emploi augmente l'attractivité de la ville et par la suite sa population. L'agent *Economic Model Agent* produit également un nombre de bâtiments nécessaires à l'hébergement des projets prévus pour la ville. Cette opération de spatialisation va consister concrètement à mettre à jour la surface totale bâtie S_{bat} (cf. section 7.3.3 page 155) des parcelles correspondantes à la nature du projet préparées au préalable par le modèle d'occupation du sol. Ce qui permet également de corrélérer ces deux modèles.

Dans ce qui suit, nous explicitons comment l'ensemble de ces agents responsables de la collecte et de la spatialisation des données des modèles sera utilisé pour gérer la différence des échelles spatiales des modèles.

7.8.3.1 Gestion de la différence des échelles spatiales des modèles de la ville de Métouia

Comme ces modèles s'exécutent à différentes échelles spatiales, ils utilisent leurs agents collecteurs (Fig. 7.7) pour ajuster l'échelle de l'espace à leur échelle lors de la collecte des entrées du modèle. Les agents de spatialisation (Fig. 7.7) sont utilisés quant à eux pour ajuster l'échelle spatiale du modèle à l'échelle de l'espace lors de la spatialisation des données. Ainsi comme l'agent modèle *Demographic Model Agent* (Fig. 7.7) travaille à l'échelle de la ville, c'est l'agent *Inhabitant City Counter Agent* (Fig. 7.7) assurera la conversion des données à l'échelle du modèle en sommant la population collectée au niveau des parcelles par l'agent *Inhabitant parcel Counter Agent* (Fig. 7.7).

Par ailleurs, comme l'agent *Inhabitant City Spatialization Agent* (Fig. 7.7) reçoit la population additionnelle à l'échelle du modèle, il doit convertir cette donnée à l'échelle de l'espace en divisant la population additionnelle sur le nombre des parcelles de type résidentiel où il y a un espace disponible c'est à dire les parcelles préparées par le modèle d'occupation du sol (densifiées ou nouvellement créées). Ainsi l'agent *Inhabitant Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) se charge de la spatialisation des données converties au niveau de la parcelle. Cette spatialisation consiste à augmenter la population de la parcelle en prenant comme hypothèse qu'un logement héberge un seul ménage et qu'un ménage est composé de 5 personnes.

Concernant le modèle économique, comme l'agent *Economic Model Agent* (Fig. 7.7) fonctionne à l'échelle de la ville alors que les données sont disponibles à l'échelle de la parcelle. Ainsi l'agent *laborForce City Counter Agent* (Fig. 7.7) se chargera donc de la conversion des données à l'échelle du modèle en créant un agent collecteur *laborForce Parcel Counter Agent* (Fig. 7.7) qui va se charger de la collecte les données à partir de la parcelle. Suite à son exécution, l'agent *Economic Model Agent* (Fig. 7.7) produit des emplois à l'échelle de la ville. Comme l'agent *Job City Spatialization Agent* (Fig. 7.7) reçoit cette donnée à l'échelle de la ville, il crée l'agent *Job Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) pour spatialiser les emplois dans les parcelles qui hébergent les activités économiques.

Quant aux bâtiments prévus pour les projets économiques, ils seront spatialisés par l'agent *Building City Spatialization Agent* (Fig. 7.7). Comme ce dernier reçoit un nombre de bâtiments à l'échelle de la ville, il va charger son sous-holon *Building Parcel Spatialization Agent* (Fig. 7.7) de spatialiser cette donnée à l'échelle des parcelles à vocation économique. Notons que pour

le modèle d'occupation du sol, on n'aura pas besoin d'établir une structure holonique d'agents pour la gestion de la différence des échelles spatiales étant donné que le modèle évolue à la même échelle de l'espace (la parcelle). En plus de la gestion des échelles spatiales, les agents responsables de la gestion du temps et de l'ordonnancement des dates d'exécution permettront de gérer l'hétérogénéité temporelle des modèles.

7.8.3.2 Gestion de l'hétérogénéité temporelle des modèles de la ville de Métouia

Nous observons que l'évolution de chacun des trois modèles choisis pour la ville de Métouia se fait conformément à son échelle temporelle. Ainsi le modèle d'occupation du sol utilisé dans notre cas d'étude évoluera avec un pas de temps égal à dix ans. De son côté le modèle démographique dispose de taux annuels pour effectuer des calculs chaque année, son échelle temporelle sera donc d'un pas de temps égal à une année. Quant au modèle économique, les ajouts des projets économiques se font tous les cinq ans. Ce décalage entre les modèles est observable sur le graphique de la figure (Fig. 7.9 (b)). Selon le modèle de couplage défini précédemment, la gestion de la différence des échelles temporelles des modèles nécessite la création d'un agent scheduleur et d'agents temps pour chacun des modèles. Ainsi sur la plateforme de simulation GAMA, nous procédons à la création d'un agent scheduleur *Scheduler Agent* (Fig. 7.7) responsable de l'ordonnancement ainsi que des agents temps *Landuse Time Agent*, *Economic Time Agent* et *Demographic Time Agent* (Fig. 7.7) pour le calcul de la future date d'exécution des modèles. Ces échelles temporelles seront récupérées des agents modèles *Landuse Agent*, *Economic Agent* et *Demographic Agent* (Fig. 7.7) sous forme de délais.

Ainsi cette hétérogénéité temporelle des modèles couplés nous permet de tester la gestion des échelles temporelles de notre approche Coupling4modeling. En effet, dans la figure (Fig. 7.9 (b)) on peut observer un décalage de 10 unités entre le temps d'exécution du modèle démographique (courbe rouge Fig. 7.9 (b)) et du modèle d'occupation du sol (courbe verte de la figure Fig. 7.9 (b)). Ce décalage est également observé par rapport au temps d'exécution du modèle économique (courbe bleue de la figure Fig. 7.9 (b)).

A ce niveau l'ordre d'exécution des modèles prend également une grande ampleur. Comme le modèle d'occupation du sol doit anticiper l'évolution de la population par la préparation de l'espace nécessaire aux logements, on va le lancer en premier au démarrage de la simulation. Ainsi dans la figure (Fig. 7.9 (b)), où on a observé les différents temps d'exécutions des modèles de la ville, on peut noter une nette avance du modèle d'occupation du sol qui a pour objectif de préparer l'espace nécessaire aux activités de la population sur les autres modèles. D'autres détails sur les résultats du modèle couplé seront explicités davantage dans ce qui suit.

7.8.3.3 Résultats de la simulation

Le simulateur formé de trois modèles produit les sorties illustrées dans la figure (Fig. 7.8). Notons que l'ensemble des taux et des paramètres qui constituent les entrées non spatiales des modèles doivent être ressaisis à chaque nouvelle révision du PAU en fonction des résultats de la simulation et des scénarios choisis par l'urbaniste. A l'introduction d'un troisième modèle nous choisissons d'observer l'évolution d'une troisième variable à savoir le nombre total d'emplois de la ville. D'après la figure (Fig. 7.9 (a)) on peut voir que l'évolution économique, démographique et géographique se fait de manière cohérente. En effet, la population évolue en fonction de l'évolution des emplois créés qui augmente l'attractivité de la ville. La capacité de la ville augmentent également pour pouvoir héberger la population additionnelle et les projets prévus pour la ville.

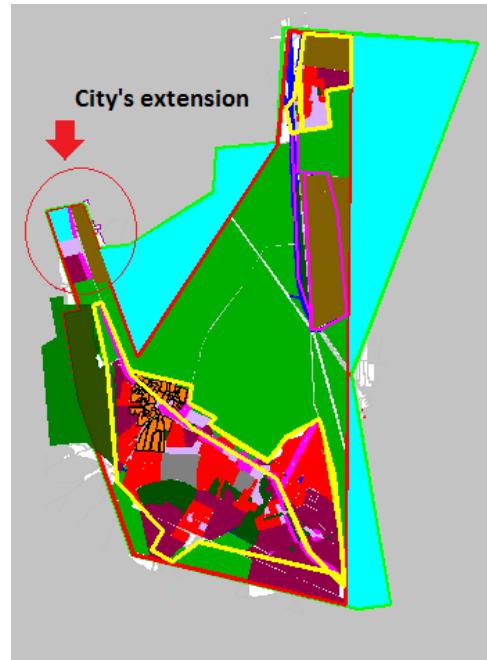


FIGURE 7.8 – La densification et l'extension de la ville de Métouia

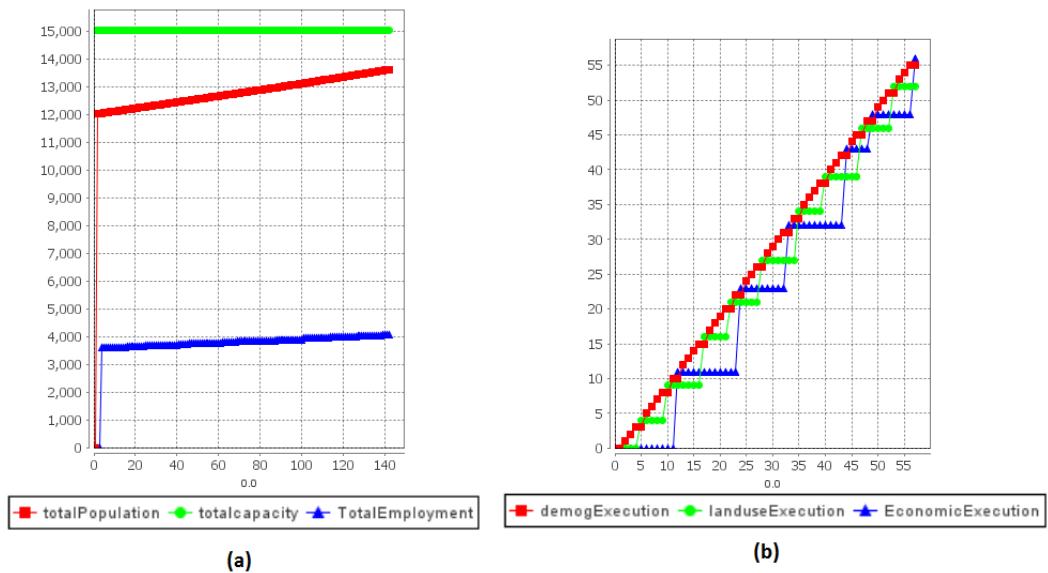


FIGURE 7.9 – (a) Évolution de la capacité, la population et les emplois de la ville de Métouia, (b) Les différents temps d'exécutions des modèles de la ville

L'intégration d'un troisième modèle réoriente l'extension de la ville dans la direction de l'ouest (Fig. 7.8) étant donné qu'on introduit un des projets prévus pour la ville à savoir la création de zones polyvalentes comportant plusieurs fonctions : résidentielles, de commerces, de services, etc. La création de ces zones doit se faire sur l'artère principale RN15 conformément aux directives des urbanistes ainsi les zones non assignées les plus proches de cette route changeront de mode d'occupation en zones polyvalentes. Ainsi pour créer le reste des logements nécessaires à la population additionnelle le simulateur transforme la parcelle non assignée la plus proche des zones polyvalentes en zones résidentielles afin de minimiser les coûts de ré-aménagement et de raccordement aux réseaux. Cette nouvelle zone d'habitat de type UAa1 va se situer donc à l'ouest de la ville également afin de recevoir des habitats individuels de type isolé à faible densité mais suffisante à la nouvelle population non encore logée.

En comparant les résultats obtenus avec les intentions des urbanistes, on peut dire que la simulation est représentative de la réalité territoriale urbaine. Quant aux besoins en équipements administratifs et socio-collectifs ainsi que les espaces verts de la ville, ils seront calculés en utilisant la base de connaissances spatiales. Pour des raisons de temps nous n'avons pas pu élaborer des scénarios de simulation plus complexes, comme la création des projets économiques, des équipements et des logements nécessaires dans une même simulation. Il aurait en effet été intéressant de voir l'organisation des groupes de logements autour de bâtiments influençant tels que les projets industriels ou les équipements publics. Pour une validation plus étendue du prototype d'outil d'aide à la décision dans le domaine du réaménagement urbain, ces scénarios devraient être mis en place dans un développement futur de notre outil de simulation.

7.9 Synthèse et discussion

Ce chapitre a pour but d'intégrer un modèle de couplage sur une plateforme de simulation conformément à la méthodologie de couplage Coupling4modeling présentée dans les chapitres précédents. Suite à un diagnostic de l'état actuel du tissu urbain et une analyse de la problématique d'aménagement de la ville de Métouia, nous avons procédé au choix des modèles les plus proches ou les plus faciles à adapter du contexte de la ville. Nous avons ainsi retenu trois modèles : un modèle d'occupation du sol GeOpenSim [PCGR10a], un modèle démographique de [HF09] et un modèle économique CityDEV [SAAG03]. En suivant les phases de l'approche Coupling4modeling nous avons pu analyser les entrées, les sorties et les échelles des modèles pour les comparer à l'échelle de l'espace et mettre en place une base de connaissances pour l'interprétation spatiale des données. Le graphe de dépendance des modèles, nous a permis de comprendre les échanges entre les modèles ainsi que les données à lire et à stocker dans l'espace. Dans la phase de conception nous avons pu identifier l'architecture du modèle et par la suite le diagramme de classes à utiliser pour intégrer le modèle sur un simulateur orienté agent.

Pour créer ce simulateur nous avons choisi la plateforme de simulation GAMA pour son caractère spatial explicite et la possibilité de la coupler au système d'information géographique de la ville de Métouia. Après discussion avec les urbanistes ce type de simulateur s'avère utile dans la mesure où il permet de prévoir la création de groupes d'habitats dans l'espace urbain prévus pour loger la population additionnelle de la ville. En outre, il offre une nouvelle représentation de l'espace urbain de nature vectorielle que l'on peut faire évoluer de façon dynamique en fonction de données d'ordre démographique et économique. Il serait toutefois intéressant de comparer, pour chacun des scénarios proposés, les organisations spatiales auxquelles conduisent chacune des simulations effectuées et ce en examinant la manière dont l'espace évolue dans chacune des démarches de ré-aménagement.

Conclusion générale

1 Bilan

Nous reprenons ici les principaux concepts abordés dans cette thèse ainsi que les caractéristiques de l'approche de couplage Coupling4modeling pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux.

1.1 Synthèse et positionnement

La question du couplage est un problème d'actualité, dans un environnement informatique caractérisé par l'apparition de systèmes de plus en plus complexes. Si de nombreux travaux de recherche s'attaquent à ce problème pour les domaines industriels, la modélisation spatiale manque encore d'outils adaptés (systèmes caractérisés par l'interaction de multiples dynamiques et entités spatiales, que nous voulons modéliser et simuler en intégrant des connaissances provenant de plusieurs disciplines). Les systèmes complexes spatiaux se caractérisent par leur hétérogénéité et leurs nombreuses interactions. Ces propriétés structurant leur dynamique globale, constituent des objets d'étude en soi et doivent, par conséquent, être prises en compte dans des modèles différents.

Ainsi, notre travail de recherche se place dans un contexte fortement interdisciplinaire où nous proposons une architecture de couplage multi-agents qui prend en considération les spécificités des systèmes complexes spatiaux. Cette problématique nous a poussé à définir des besoins pratiques forts comme la réutilisation et l'interopérabilité des modèles existants et à recentrer notre travail de recherche sur des exemples pratiques de systèmes complexes spatiaux.

L'approche Coupling4modeling offre une nouvelle vue d'ensemble de la ville considérée comme un système complexe spatial socio-économique. Le modèle de couplage de la ville de Métouia a été construit en se basant sur les concepts organisationnels et hiérarchiques de l'approche Coupling4modeling. Cette nouvelle approche de modélisation de l'espace géographique permet d'apporter des changements intéressants aux modèles SIG classiques, par la prise en compte de lois dynamiques propres à l'espace urbain.

Ceci se fait à travers le couplage d'un modèle démographique, un modèle économique et un modèle d'occupation du sol contribuant à produire de nouvelles structures urbaines. Ces modèles agissent sur l'environnement de la ville qui est intégré sous forme d'un système d'information graphique où les données non spatiales des modèles sont interprétées grâce à une base de connaissances spatiales. L'espace permet ainsi de corrélérer des modèles qui ne sont pas forcément conçus pour interagir ensemble. Le résultat du couplage est observé au niveau de l'espace qui évolue en prenant en considération les facteurs démographiques, les facteurs économiques ainsi que les contraintes spatiales de la ville de Métouia.

La demande récurrente, exprimée par les aménageurs, d'outils prospectifs d'aide à la décision pour la planification de l'aménagement des espaces urbains ne peut être satisfaite que par le développement de modèles thématiques valides. Ce cadre de modélisation s'adresse avant tout aux chercheurs thématiciens avec pour premier objectif de faciliter l'implémentation de modèles interdisciplinaires, susceptibles de répondre à une problématique spatiale spécifique.

La technique du couplage permet donc à ces experts de ré-exploiter les matériels théoriques de leurs différentes disciplines pour construire un nouveau modèle avec une plus grande puissance descriptive [AGG⁺01] et une meilleure vue sur le système complexe spatial étudié. Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs modèles facilite l'interaction entre les paramètres et les acteurs du système mais pose certaines contraintes à respecter comme l'hétérogénéité des formalismes et des échelles des modèles.

Pour répondre à ces problèmes de complexité et de couplage de modèles hétérogènes, le modèle de couplage est conçu comme un ensemble d'agents-modèles en interaction et la simulation comme l'activité de cette société d'agents. La solution permet alors de distribuer le contrôle dans le système via les agents. Ce système multi-agents de couplage a donc permis d'aborder la construction de modèle complexe de manière rationnelle et incrémentale où le simple ajout d'un agent permet d'intégrer une nouvelle composante ou une nouvelle dynamique du système. Elle a permis également d'exploiter les propriétés des systèmes multi-agents comme l'ouverture, l'émergence ou encore l'auto-organisation pour s'adapter aux spécificités des systèmes complexes spatiaux. Les agents deviennent ainsi autonomes et fortement détachés du modèle global.

Coupling4modeling offre la possibilité de réutiliser, de rendre interopérable et modulaire des modèles hétérogènes existants. Elle s'inscrit dans la lignée des approches de modélisation organisationnelles de type holonique et orientées composants qui représentent des modèles hétérogènes à coupler dans le respect de la cohérence du modèle global. Ce couplage des modèles se fait via une synchronisation des agents par rapport à l'espace étudié. Le rôle des interactions entre les agents revêt une importance primordiale selon cette approche de modélisation basée sur le couplage et le résultat de ces interactions peut conduire à la formation de structures interprétables à plusieurs niveaux d'observation au niveau de l'espace. Pour mettre en évidence les apports de cette recherche, nous reprenons dans ce qui suit les différents volets de notre contribution scientifique dans le cadre de la modélisation des systèmes complexes spatiaux.

1.2 Contributions scientifiques

Plusieurs contributions peuvent être dégagées des précédents chapitres de la thèse, dont les plus importantes sont énumérées dans ce qui suit.

Classification des modèles de couplage

Nous avons commencé par présenter notre propre classification des méthodes et modèles de couplage basée sur le principe de couplage (à savoir le couplage de simulateurs, le couplage de modèles par intermédiaire, le couplage de modèles par l'identification d'un facteur commun de couplage, le couplage de modèles par intégration). Cette classification a été illustrée grâce à l'outil BSK [Bel14], un logiciel de sériation des données par scalogramme de Guttman [Gut44]. Les principales limites des solutions proposées proviennent du fait qu'elles restent très liées à un cas d'étude particulier et qu'elles n'intègrent pas l'espace comme facteur de couplage. Ce qui limite la générnicité de ces méthodes et les rend inappropriées aux spécificités des systèmes complexes spatiaux.

Une méthodologie de couplage

Pour répondre à ces inconvénients notre approche de couplage Coupling4modeling se base sur une méthodologie qui aborde la problématique de couplage en six phases distinctes : analyse des modèles, construction de la base de connaissances spatiales, corrélation des modèles, conception du modèle de couplage, encapsulation des modèles et l'implantation des agents en charge du couplage. Notons qu'une des originalités de notre méthodologie se situe dans la construction d'une base de connaissances spatiales pour assurer le couplage. En effet, les travaux environnementaux auxquels nous nous intéressons dans cette thèse, opèrent sur des données spatiales et des données non spatiales. La construction d'une base de connaissances s'intéresse donc à l'interprétation des données non spatiales lors de l'échange des données à travers l'espace.

Une Architecture de couplage organisationnelle de type holonique

Le métamodèle de couplage sur lequel se base cette architecture est construit selon l'organisation AGRE (Agent, Groupe, Rôle, Environnement) [FB05] et sur les holons. Cette notion d'holon permet de créer un super holon (un agent modèle) qui constitue le seul point de connexion avec le modèle à partir duquel sont créés des agents collecteurs, des agents temps et des agents de spatialisation relatifs au modèle. Ces agents peuvent être également décomposés jusqu'à atteindre le niveau d'abstraction souhaité pour la collecte ou la spatialisation des données. Cet agent modèle permet également d'encapsuler les modèles dans un formalisme agent et de se détacher du formalisme original du modèle pour gérer ainsi l'hétérogénéité des formalismes des modèles récupérés à partir de la littérature. Cette architecture organisationnelle de type holonique a donc l'avantage de garantir la réutilisation des modèles, la modularité, l'interopérabilité dans notre métamodèle de couplage ainsi que l'hétérogénéité et la différence des échelles des modèles à coupler.

Gestion de la différence des échelles spatiales

Ce système multi-agents est formé d'holons organisés en groupes dans lesquels les agents (holons) peuvent se décomposer en d'autres agents (sous-holons). La création des agents (sous-holons) se fait en fonction des besoins du modèle. Il est ainsi possible de faire cohabiter dans le même modèle couplé des niveaux d'abstraction différents (simulation multi-niveaux). Ainsi les agents collecteurs et les agents de spatialisation responsables respectivement de la collecte des entrées et de la spatialisation des sorties du modèle se décomposent jusqu'à atteindre le niveau d'abstraction souhaité. Les agents s'adaptent ainsi à leur environnement en transformant leurs perceptions de l'environnement et leurs actions au moyen d'opérations de conversion d'échelles. Si l'échelle de chaque modèle est adaptée à l'échelle de l'espace cela veut dire indirectement que les échelles des modèles sont adaptées les unes aux autres. Cela nous permet de dissocier les problématiques du couplage des modèles eux-mêmes.

Gestion de la différence des échelles temporelles

La simulation qui permet d'observer le résultat du couplage est à base d'évènements discrets. En effet, le déroulement des actions se fait de manière événementielle, dans le sens où l'exécution d'un modèle permet de passer à une autre date d'exécution d'un autre modèle. Ces dates ont été ordonnancées par un agent scheduler dans une liste ordonnée qui a permis de les trier par ordre croissant. Ces dates d'exécution sont calculées par des agents temps qui ont pour rôle de transformer les échelles temporelles des modèles en des dates qui peuvent être ordonnancées à l'échelle de la simulation. Ce qui permet de maîtriser le fonctionnement des modèles et de gérer

l'hétérogénéité des échelles temporelles.

Algorithmes de gestion de la différence des échelles spatiales et temporelles

Pour assurer la traduction du modèle conceptuel en un modèle computationnel, il est essentiel de passer par l'écriture des algorithmes. Notre attention s'est portée donc sur le développement d'un ensemble d'algorithmes pour la gestion de la différence des échelles spatiales et temporelles des modèles. Nous avons présenté deux versions d'algorithmes la première est centralisée, la seconde est distribuée adaptée à la vision multi-agents étant donné que nous comptons implémenter ces algorithmes avec le paradigme agent. Le choix de la version centralisée ou distribuée va dépendre des choix conceptuels du modélisateur qui veut attribuer la tâche de la gestion des échelles à une seule entité ou distribuer cette tâche entre plusieurs entités qui peuvent être des agents, des processus, etc. Le caractère générique qui caractérise ces algorithmes permet de les réutiliser dans d'autres problématiques multi-échelles en dehors du couplage.

2 Discussion

Les résultats de la simulation observés suite à l'application de l'approche Coupling4modeling sur le système urbain de la ville de Métouia, nous ont permis de mettre en évidence l'utilité d'utiliser l'espace comme facteur de couplage. En effet, en plus d'offrir aux modèles un espace d'échanges de leurs résultats, le SIG de la ville de Métouia permet d'observer directement le résultat du couplage. L'utilisation des agents, comme des entités responsables du lien entre le modèle et l'espace, permet de gérer l'hétérogénéité des échelles spatiales et temporelles. Plus généralement, le système multi-agents de Coupling4modeling joue le rôle de médiateur entre les contraintes du modèle global couplé et celles des modèles internes qui le composent. Ceci se fait d'une façon transparente par rapport au thématicien qui voudrait bénéficier de l'outil d'aide à la décision à caractère spatial.

Néanmoins en réutilisant et en couplant des modèles, il est nécessaire d'aborder la question de la validation qui se pose dans notre cas à plusieurs niveaux. Nous pouvons distinguer deux phases dans la validation du modèle : interne et externe. Dans l'étape de la validation interne, il est nécessaire de valider la conformité entre les spécifications et le programme implémenté. On peut dire que c'est le cas dans ce travail, suite aux comparaisons faites entre l'architecture du modèle couplé intégré sur la plateforme GAMA et l'architecture de couplage définie dans Coupling4modeling. Par la suite, la validation externe va consister à apporter des indices qui permettent de dire si le modèle est effectivement conforme aux phénomènes observés ou pas. Dans le cas du couplage, cette validation externe comprend elle-même deux phases. Il s'agit dans un premier temps de valider le modèle couplé dans sa globalité par rapport au système étudié dans sa totalité quand cela est possible. Dans un second temps, il est nécessaire de valider chaque modèle élémentaire par rapport à la partie du système représenté.

Plus particulièrement, la validation du modèle dans sa globalité consiste à comparer les résultats fournis par ce modèle avec les résultats attendus et quantifier ainsi l'erreur faite par rapport au phénomène correspondant. Pour ce faire, il est nécessaire de collecter des données sur le système étudié par l'observation ou l'expérimentation ou l'expertise du thématicien. Ainsi notre prototype a été validé par rapport aux besoins fondamentaux des urbanistes, qui ont eu la possibilité de tester des scénarios d'aménagement en se basant sur des indicateurs particu-

liers comme les taux de croissance démographique, les taux d'attractivité de la ville, etc. Cet outil d'aide à la décision permet aux urbanistes principalement de disposer d'un outil de représentation dynamique de certains processus urbains même s'il doit encore faire l'objet d'un perfectionnement.

3 Coupling4modeling et directions futures

Pour perfectionner le fonctionnement global du modèle couplé nous proposons principalement deux axes d'amélioration à savoir : la calibration automatique du modèle et le couplage des simulateurs dans une plateforme de couplage distribuée.

Calibration automatique du modèle

Un des principaux objectifs des outils d'aide à la décision, comme celui développé dans le cadre de cette thèse, est de guider les thématiques dans la construction et la manipulation du modèle implanté. Ceci nécessite de permettre à ces modélisateurs de tester des scénarios variables sur un même espace. Dans ce sens, la première perspective de ce travail peut être dans l'automatisation du calibrage [Lou09] qui permet d'attribuer de façon systématique des scores aux configurations produites. Certaines configurations peuvent ensuite servir de valeurs de référence.

Cette étape de calibrage nécessite au préalable une pondération des paramètres qui interviennent dans les configurations possibles de l'espace. L'idée est d'orienter le choix du prochain jeu de valeurs de paramètres à tester de façon à trouver les meilleurs scénarios de l'exploitation de l'espace qui optimisent les indicateurs clés du système complexe spatial étudié. L'utilisation des techniques de calibrage automatique constitue une avancée réelle dans la maîtrise des méthodes computationnelles d'expérimentation, au même titre que la définition de plans d'expériences rigoureux ou l'analyse statistique en profondeur des sorties [Lou09].

Dans leurs travaux, [DVM02] et [PR04] proposent d'utiliser des agents de calibration pour changer automatiquement les paramètres des modèles. Ainsi l'architecture multi-agents conçue dans le cadre de cette thèse peut servir au niveau du calibrage automatique du modèle couplé pour que les résultats de simulation obtenus soient proches des observations menées sur le système réel étudié. Cependant cette intégration s'avère être une opération épineuse, en raison du grand nombre de paramètres à tester et de configurations possibles dans les systèmes complexes spatiaux.

Couplage des simulateurs dans une plateforme distribuée

Comme indiqué précédemment, nous nous sommes limités dans le cadre de cette thèse au couplage des modèles sans descendre au niveau technique du couplage qui permet de coupler des simulateurs. En effet, coupler des modèles implantés sur des simulateurs nécessiterait de développer davantage notre approche de couplage pour pouvoir implanter les modèles sous forme de composants légers (plugins) [Sie11]. Le système multi-agents permettra dans ce cas d'établir des canaux de communication entre les différents composants du multi-modèle de couplage. Or l'implémentation de ces différentes simulations spatiales risque de consommer beaucoup de ressources physiques. Si nous ajoutons à cela le nombre important des données échangées et des calculs effectués par les modèles, l'exécution de ces derniers sur une même machine peut devenir contraignante dans certains cas.

Nous pensons donc qu'il serait plus intéressant de remplacer cette implantation centralisée par la distribution de l'exécution des simulateurs à coupler sur des machines connectées en ré-

Conclusion générale

seau. Aux niveaux dynamique et technique, le système multi-agents de couplage peut aussi être exploité pour gérer les problèmes de distribution de la simulation. En effet, dans beaucoup de travaux le paradigme agent a montré son efficacité pour assurer la fiabilité [DVM02] et l'optimisation des performances de la simulation distribuée [Seb09]. Ainsi en plus de la distribution de l'environnement virtuel du système complexe spatial étudié, l'ensemble des agents de couplage peuvent être distribués sur l'ensemble des nœuds de la simulation. Par ailleurs, si ces agents vont migrer de serveur en serveur, la mobilité de code des agents devient dans ce cas un aspect à prendre en considération. En plus, la mobilité du code des agents devient un aspect important à prendre en considération pour optimiser les simulations.

Notons que l'implantation distribuée idéale se ferait à travers une méthode de déploiement automatisée qui permettrait de répliquer les plateformes de simulation afin de pallier aux pannes et stabiliser ainsi les échanges de messages [Sie11]. Par ailleurs, en termes de robustesse, l'exécution en parallèle d'une simulation sur plusieurs ordinateurs nécessiterait la mise en place d'un système d'ordonnancement performant [MLCP06].

Bibliographie

- [ABC¹¹] M. Arnold, T. Blochwitz, C. Claub, T. Neidhold, T. Schierz, and S. Wolf. Fmi-for-cosimulation. In *The International Journal of Multiphysics. Special Edition : Multiphysics Simulations. Advanced Methods for Industrial Engineering.*, page 345–356, 2011.
- [ABE¹²] A. Abel, T. Blochwitz, A. Eichberger, P. Hamann, and U. Rein. Functional mock-up interface in mechatronic gearshift simulation for commercial vehicles. In *9th International Modelica Conference. Munich*, 2012.
- [ACaNN97] Rodriguez A., Grueau C., and Raper J. ans Neves N. Research on spatial agents, 1997.
- [ACBD09] E. Amouroux, T.Q. Chu, A. Boucher, and A. Drogoul. Gama : An environment for implementing and running spatially explicit multi-agent simulations. *Agent Computing and Multi-Agent Systems*, 5044 :359–371, 2009.
- [AGG⁰¹] C. Agarwal, GM. Green, JM. Grove, TP. Evans, and CM. Schweik. A review and assessment of land-use change models : dynamics of space, time, and human choice. usda forest service general technical report ne-297. Technical report, Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change, Indiana University, Bloomington (IN) and USDA Forest Service, 2001.
- [AGJ⁰⁹] M. Akplogan, F. Garcia, A. Joannon, R. Martin-Clouaire, and G. Quesnel. Un modèle de agent intelligent : application à la conduite des systèmes de culture. In *Journées Francophones Planification Décision Apprentissage (JFPDA)*, Paris, France, 2009.
- [All04] R. Allain. *Morphologie urbaine : Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin, 2004.
- [Alo64] W. Alonso. *Location and Land Use, Cambridge, Mass.* Harvard University Press, 1964.
- [AM97] Langlois A. and Phipps M. *Automates cellulaires : application à la simulation urbaine*. Hermès, 1997.
- [AP06a] F. Amblard and D. Phan. *Modélisation et simulation multi-agents : Applications pour les Sciences de l'Homme et à la Société*. Hermès science publications, 2006.
- [AP06b] F. Amblard and D. Phan. *Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les sciences de l'Homme et de la société*. Hermès Science Publication, 2006.
- [APD88] Dupagne A., Leclecq P., and Pirotte D. Système basé sur de la connaissance appliquée à la réglementation urbaine. In *Journées Européennes sur l'application de l'intelligence artificielle*

- [AS79] P. M. Allen and M. Sanglier. A dynamic model of growth in a central place system. *Geographical Analysis*, 11 :256–272, 1979.
- [AS94] S. Appleby and S. Steward. Mobile software agents for control in telecommunications networks. *BT Technol. J.*, 12 :104–116, 1994.
- [AT03] T. Arentze and H. Timmermans. Modeling agglomeration forces in urban dynamics : a multi-agent system approach. In *Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban management*, Sendai, Japon, 2003.
- [Bae92] C. Baeijs. *Fonctionnalité Emergente dans une Société d'Agents Autonomes, Etude des Aspects Organisationnels dans les Systèmes Multi-Agents Réactifs*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [Ban01] J. Banks. The future of simulation. *Dans actes de la troisième conférence francophone de MODélisation et SIMulation*, 3, 2001.
- [BBMW97] F. Bousquet, O. Barreteau, C. Mullon, and J. Weber. Modélisation d'accompagnement : Systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables. In *In : Quel environnement au XXI^{ème} siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie. Proceedings of a workshop at the Abbaye de Fontevraud*, 1997.
- [BBPL98] F. Bousquet, I. Bakam, H. Proton, and C. LePage. Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. *Lecture Note in Computer system*, 1416 :826–838, 1998.
- [BBTLc00] F. Burel, J. Baudry, C. Thenail, and D. Le coeur. Relationships between farming system and ecological patterns along a gradient of bocage landscapes. *Consequences of landuse changes*, pages 227–246, 2000.
- [BD97] O. Boissier and Y. Demazeau. Une architecture multi-agents pour des systèmes de visions ouverts et décentralisés. *Techniques et Sciences Informatiques*, 16(8) :1039–1062, 1997.
- [BDS⁺96] R.E. Boerner, M.N. DeMaers, J.W. Simpson, F.J. Artigas, A. Silva, and L.A. Berns. Markov models of inertia and dynamism on two contiguous ohio landscapes. *Geographical Analysis*, 28 :56–66, 1996.
- [BDS08] J. Beirao, J. Duarte, and R. Stouffs. City induction generation module - structuring a generative model for urban design : linking gis to shape grammars. In *Third International Conference on Design Computing and Cognition, Workshop 1 Generative Urban Design*, June 2008.
- [Bel96] P. Belouze. *Un modèle intégré d'un système irrigué par la prise en compte de phénomènes hydrauliques, économiques et hydro-pédologiques : application sur le périmètre irrigué de Chishtian, Penjab sud, Pakistan*. PhD thesis, Université de Montpellier, 1996.
- [Bel14] A. Belkaïd. *Morphose du volume englobant réglementaire*. PhD thesis, Thèse de doctorat en Sciences de l'Architecture ENAU, Université de Carthage, Tunis, 2014.
- [Ber01] T. Berger. Agent-based spatial models applied to agriculture : a

-
- simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25 :245–260, 2001.
- [BG88] A. H. Bond and L. Gasser. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988.
- [BG99a] F. Bousquet and D. Gautier. Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs". *Cybergeo : European Journal of Geography*, 1999.
- [BG99b] F. Bousquet and D. Gautier. Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches spatiales et acteurs. *Revue européenne de géographie*, 89 :45–50, 1999.
- [BG09] Z. Brahmi and M.M. Gammoudi. Hierarchical organization of agents based on galois sub-hierarchy for complex tasks allocation in massive mas. *Agent and Multi-Agent Systems : Technologies and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 5559 :460–470, 2009.
- [BH03] I. Benenson and E. Hatna. Human choice behavior makes city dynamics robust and, thus, predictable. In *Proceedings of the 7th International Conference on Geo-Computation*, University of Southampton, 2003.
- [BHS08] F. Ben Hawala and N. Said. L'adoption d'une approche organisationnelle pour la conception et la réalisation d'un système multi-agents d'acquisition coopérative d'information, 2008.
- [BJL01] Rouchier J. Bonnefoy J. L., Bousquet F. Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle. *L'Espace géographique*, 1 :13–25, 2001.
- [BN04] P. Berger and J.P. Nouhaud. *Formes cachées, la Ville*. Lausanne : PPUR, 2004.
- [Boe09] de. Boer. Citycad software : Stop masterplanning ! the pop-up city, 2009. (accessed May 27, 2010).
- [Bon08] S. Bonneaud. *Des agents-modèles pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes Application à l'écosystémique des pêches*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2008.
- [BP10] A. Bretagnolle and D. Pumain. *Qu'appelle t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*, chapter Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents (Europe, Etats-Unis). G. Weisbuch et A. Zwirn, 2010.
- [Bro91] R. A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47 :139–159, 1991.
- [BYCA98] D. Benslirnane, K. Yetongnon, S. Chraibi, and E. H. Abdelwahed. Deca : une architecture multi-agents pour l'interopérabilité de bases de données hétérogènes. In *Acte du 4ème colloque africain sur la recherche en informatique*, pages 269–281, Ottawa, Canada, 1998. Dans Tchuente,M., éditeur.
- [Cap08] H. Capron. Economie régionale et urbaine, 2008.
- [CB90] M. Callon and Latroub B. *La science telle qu'elle se fait*. Ed. La Découverte, 1990.
- [CdIM01] B. Chaib-draa, Jarras I., and B. Moulin. Systèmes multi-agents : Principes généraux et applications. *Principes et archi-*

- ture des systèmes multi-agents, pages 28–70, 2001.
- [CdJM01] B. Chaib-draa, I. Jarras, and B. Moulin. Systèmes multi-agents : Principes généraux et applications. *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, J.-P. Briot et Y. Demazeau, Collection IC2 :27–70, 2001.
- [CG98] K.C. Clarke and L. Gaydos. Loose-coupling a cellular automaton model and gis : long-term urban growth prediction for san francisco and washington/baltimore. *International Journal of Geographic Information Science*, 12 (7) :699–714, 1998.
- [CGG07] M. Cossentino, V. Gaud, N. Hilaire, and A. Galland, S. Koukam. Aspecs : an agent-oriented software process for engineering complex systems. In *In Proc. of the Fifth Agent Oriented Software Engineering Technical Forum (AOSE-TF5)*, Hammameth, Tunisia, 2007.
- [CGGG02] D. Capera, J-P. Georgé, M-P. Gleizes, and P. Glize. Un défi pour les sma : explorer l'émergence. systèmes multi-agents et systèmes complexes. In *Actes des JFIADSMA '02*, pages 159–162, Lille, France, 2002.
- [CGGG03] D. Capera, J. P. Georgé, M.P. Gleizes, and P. Glize. The amas theory for complex problem solving based on self-organising cooperative agents. In *International Workshop on Theory and Practice of Open Computational Systems (TAPOCS)*, pages 383–388, Los Alamitos, CA, 2003.
- [CGM06] L. Caneparo, F. Guerra, and E. Masala. Urbanlab – generative platform for urban and regional design. In *In Proceedings : 8th International DDSS Conference. Progress in Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, The Netherlands, 2006. Jos P. van Leeuwen and Harry J.P. Timmermans Ed.
- [Cha04] H. Chamussy, 2004.
- [Chr66] W. Christaller. *Central Places in Southern Germany*. C. Baskin, Prentice Hall, 1966.
- [Cor61] Rand Corporation. *Transportation for future urban communities : a study prospectus*, Santa Monica. 1961.
- [CPCR07] G. Caruso, D. Peeters, J. Cavallès, and M. Rounsevell. Spatial configurations in a periurban city. a cellular automata-based microeconomic model. *Regional Science and Urban Economics*, 37 :542–567, 2007.
- [CW96] J. O. Calvin and R. Weatherly. An introduction to the high level architecture (hla)runtime infrastructure (rti). In *Proceedings of the 14th DIS Workshop*, pages 103–114, 1996.
- [Dau02] E. Daude. Localisations et dynamiques de diffusion des agences de travail intérimaire en france. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2 :257–274, 2002.
- [DC02] Badriotti D. and Weber C. La mobilité résidentielle en ville. modélisation par automates cellulaires et système multi-agents à bogota. *Espace Géographique, Analyse urbaine*, 2 :97–108, 2002.
- [DeL06] M. DeLanda. *A New Philosophy of Society, Assemblage Theory and Social Complexity*. Continuum, New York, 2006.
- [Dem91] Y. Demazeau. Coordination patterns in multi-agent worlds : Application to robotics and compu-

-
- ter vision. In *proceedings of the IEEE colloquium on intelligent agents, London : IEEE*, 1991.
- [Dem95] Y. Demazeau. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science*, pages 117–132, Saint-Malo, 1995.
- [DFF⁺98] D. Dias, G. Fox, W. Furmanski, V. Mehra, B. Natarajan, H. Ozdemir, S. Pallickara, and Z. Ozdemir. Exploring jsda, corba and hla based muatech's for scalable televirtual (tyr) environments. In *Proceedings of the Workshop on object Orientation and VRML*, 1998.
- [DGG02] R. Duboz, N. Giambiasi, and N. Giambiasi. Introduction à la modélisation à évènements discrets - modélisation d'un système prédateur. Technical report, Rapport de recherche RILLIL-2002-02, Laboratoire d'Informatique du Littoral - ULCO, 2002.
- [DMPE08] A. Doniec, R. Mandiau, S. Piechowiak, and S. Espié. A behavioral multi-agent model for road traffic simulation. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 21 :1443–1454, 2008.
- [DPBL07] D. David, D. Payet, A. Botta, and G. Lajoie. Un couplage de dynamiques comportementales : le modèle ds pour l'aménagement du territoire. In *Journées Francophones des systèmes multi-agents JFSMA 2007*, pages 129–138, Carcassonne, France, October 2007. Cepadues Editions.
- [dpgl03] E. dubos paillard, Y. guermond, and P. langlois. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. le modèle spacelle. *L'Espace géographique*, 4 :357–378, 2003.
- [DRG02] R. Duboz, E. Ramat, and N. Giambiasi. Utilisation du formalisme devs pour la spécification de systèmes d'agents réactifs. In *Actes des JFIAD-SMA*, pages 99–101, Lille, France, October 2002. Hermes science.
- [DT97] A. Dupagne and J. Teller. Représentation de l'espace ouvert dans un système d'information de projet urbain. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 5(2) :219–240, 1997.
- [DTG] A. Drogououl, P. Taillandier, and B. Gaudou. Gama-platform.
- [Dub04] R. Duboz. *Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes, Application à la modélisation multi-échelle en écologie marine*. PhD thesis, Université du Littoral Côte d'Opale, 2004.
- [Duc05] E. Ducom. *Le modèle des ceintures limitrophes (fringe belts) : une application aux villes françaises*. PhD thesis, Université de Rennes 2 Haute Bretagne, 2005.
- [DVM02] A. Drogoul, D. Vanbergue, and T. Meurisse. Multi-agent based simulation : Where are the agents ? In *Proceedings of the Third International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation (MABS)*, pages 1–15, Bologna, Italy, July 2002. Springer Verlag.
- [Eas03] J.R. Eastman. Idrisi kilimanjaro : guide to gis and image processing. Technical report, Clark Labs, Clark University, 2003.
- [ElG07] J. ElGhordaf. *Modélisation et Etude Mathématique et Informatique de Modèles en Dynamique Urbaine, Application à la Ville de Marrakech*. PhD thesis, UNIVERSITÉ CADI AYYAD FACULTÉ DES SCIENCES

- SEMLALIA-MARRAKECH, 2007.
- [Elm85] M. Elmakhchouni. *Contribution à l'étude d'un système graphique intelligent pour la planification urbaine : SYGRIPOS, simulation visuelle des plans d'occupation des sols*. PhD thesis, INSA de Lyon, 1985.
- [Fau01] D. Faucher. *Modélisation déclarative des enveloppes urbaines réglementaires*. PhD thesis, Université de Nantes, 2001.
- [FB05] F. Ferber, J. and Michel and J. Baez. Agre : Integrating environments with organizations. In *First international workshop on environments for multi-agent systems*, New York, USA, 2005. Springer-Verlag.
- [FDB97] N. Ferrand, Y. Demazeau, and C. Baejs. Des systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problèmes spatialisés. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 5(2), 1997.
- [FDB98] N. Ferrand, Y. Demazeau, and C. Baejs. Systèmes multi-agents réactifs pour la résolution de problèmes spatialisés. *Numéro spécial sur l'IAD et les SMA, Revue d'IA*, 12 :37–72, 1998.
- [FER95] J. FERBER. *Les systèmes multi-agents*. InterEditions, 1995.
- [Fer97] J. Ferber. *Technique et science informatiques*. HERMES, 1997.
- [Fer03] N. Ferrand. *Modèles multi-agents pour l'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire*. PhD thesis, Université de Joseph Fourier(France), 2003.
- [FGM04] J. Ferber, O. Gutknecht, and F. Michel. From agents to organizations : An organizational view of multi-agent systems. *Lecture notes in computer science*, 2935 :443–459, 2004.
- [Fia01] Y. E. Fianyo. *Couplage de modèles à l'aide d'agents : le système OSIRIS*. PhD thesis, Université PARIS IX-Dauphine UFR Sciences Des Organisations (France), 2001.
- [For69] J. W. Forrester. *Urban Dynamics*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1969.
- [FT97] M. Fujita and J. F. Thisse. économie géographique, problèmes anciens et nouvelles perspectives. *Annals of Economics and Statistics*, 45 :37–87, 1997.
- [FTP98] E. Fianyo, J.P. Treuil, E. Perrier, and Y. Demazeau. Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes : the representation of time. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 226–236, Paris, France, July 1998. Springer.
- [FZ92] P. Fishwick and B.P. Zeigler. A multimodel methodology for qualitative model engineering. *ACM Transactions on Modelling and Computer Simulation*, 1(2) :52–81, 1992.
- [Gau07] N. A. Gaud. *SYSTÈMES MULTI-AGENTS HOLONIQUES : DE L'ANALYSE À L'IMPLANTATION*. Méta-modèle, méthodologie, et simulation multi-niveaux. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2007.
- [GAH04] C. Gaucherel, J. Baudry, D. Auclair, and F. Houiller. Gaucherel c., baudry j., auclair d., houiller f. Technical report, INRA SAD-Armorique, 2004.
- [GBD09] R. Ghnemmat, C. Bertelle, and G.H.E. Duchamp. Swarm intelli-

-
- gence for urban dynamics modeling. *American Institute of Physics*, 1117 :105–115, 2009.
- [GBG00] N. Giambiasi, Escudé B., and S. Gosh. A generalized discrete event specification for accurate modelling of dynamic systems. *Transaction of the Society for Computer Simulation International*, 17(3) :120–134, 2000.
- [GBMD10] J. Gil, J. Beirão, N. Montenegro, and J. Duarte. Assessing computational tools for urban design. In *In : eCAADe 2010, Conference : Future Cities*, 2010.
- [GD10] J. Gil and J.P. Duarte. A review of urban design sustainability evaluation tools, 2010.
- [GDB08] M.A. Groothuis, A.S. Damstra, and J.F. Broenink. Virtual prototyping through co-simulation of a cartesian plotter. In *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 697–700, Hamburg, Germany, 2008.
- [Geo04] J. P. Georgé. *RESOLUTION DE PROBLEMES PAR EMERGENCE Étude d'un Environnement de Programmation Émergente*. PhD thesis, UNIVERSITE TOULOUSE III - PAUL SABATIER, 2004.
- [GGB⁺06] V. Ginot, S. Gaba, R. Beaudouin, F. Aries, and H. Monod. Combined use of local and anova-based global sensitivity analyses for the investigation of a stochastic dynamic model : Application to the case study of an individual-based model of a fish population. *Ecological Modelling*, 193 :479–491, 2006.
- [GMP⁺96] F. Guérin, H. Mathian, D. Pu main, L. Sanders, and S. Bura.
- [GQHL09] J. Gil-Quijano, G. Hutzler, and T. Louail. De la cellule biologique à la cellule urbaine : retour sur trois expériences de modélisation multi-échelles à base d'agents. In *Proceedings JFSMA09*, pages 187–196, Lyon, France, 2009.
- [Gra59] P.P. Grassé. La théorie de la stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs. *Insectes Sociaux*, 6 :41–84, 1959.
- [GS00] HLA Working Group and S. C. Symington. Ieee standard for modeling and simulation (m&s) high lavel architecture (hla)-framework and rules. In *IEEE-SA Standards Board*, 2000.
- [GT00] N. Gilbert and P. Terna. How to build and use agent-based models in social science. *Mind and Society*, 1(1) :57–72, 2000.
- [Gut44] L. Guttman. A basis for scaling qualitative data. *American Sociological Review*, 9 :139–50, 1944.
- [Hat91] J.P. Haton. *Le raisonnement en intelligence artificielle, Modèles, techniques pour les systèmes à bases de connaissances*. Inter Editions, 1991.
- [Hat93] F. Hatem. *La prospective : pratiques et méthodes*. Paris, Econo mica série "Gestion", 1993.
- [Hav94] V. Havelange. Sciences cognitives et tradition sociologique. *Revue internationale de systémique*, 8, 1994.
- [Heu94] J.C. Heudin. *Vie artificielle*. Hermès, 1994.
- [HF09] A. Hadjyahia and F. FenDouli. Rapport de présentation de la ville de métouia, 2009.

- [HJ97] R. Hickey and P. Jankowski. Gis and environmental decision-making to aid smelter reclamation planning. *Environment and Planning*, 29 (1) :5–19, 1997.
- [HLMT12] I. Hassoumi, C. Lang, N. Mervilleau, and M. Temani. Toward a spatially-centered approach to integrate heterogeneous and multi-scales urban component models. In *Advances in Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, 10th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, pages 81–86, Salamanca, Spain, March 2012. Springer.
- [HMFB01] D. Helbing, P. Molnar, I. J. Farkas, and K. Bolay. Self-organizing pedestrian movement. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 28(3) :361–383, 2001.
- [HMWF03] Y. Hammam, A. Moore, P.A. Whigham, and C. Freeman. *A Vector-Agent Paradigm for Dynamic Urban Modelling*. Citeseer, 2003.
- [Hof82] D.R. Hofstadter. Artificial intelligence : subcognition as computation. rapport technique n°132. Technical report, Indiana University Bloomington, 1982.
- [Hou06] T. Houet. *Occupation des sols et gestion de l'eau : modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (application au SAGE du Blavet)*. PhD thesis, Université de Rennes2, 2006.
- [HP85] R.D. Holt and J. Pickering. Infectious disease and species coexistence : a model of lotka–volterra form. *Am. Nat.*, 126 :196–211, 1985.
- [HRR98] Parunak H.V.D., Savit R., and Riolo R.L. Agent-based mo-
- [HSB02] [Hur94] [HWT⁺05] [INS04] [Jac69] [JCL⁺96a] [JCL⁺96b] [JDC06]
- delling vs. equation-based modelling : A case study and users' guide. In *Proceedings of Workshop on Multi-agent systems and Agent-based Simulation*, pages 10–25. Springer, 1998.
- J.F. Hübner, J.S. Sichman, and O. Boissier. A model for the structural, functional, and deontic specification of organizations in multiagent systems. *LNCS (LNAI)*, 2507 :118–128, 2002.
- J.M. Huriot. *Von Thünen. Économie et espace*. Paris, Economica, 1994.
- A. Hamilton, H. Wang, A. M. Tanayyer, Y. Arayici, X. Zhang, and Y. Song. Urban information model for city planning. *Special Issue From 3D to nD modelling*, 10, 2005.
- Recensement général de la population et de l'habitat, 2004.
- J. Jacobs. *The Economy of Cities*. New York : Vintage Books, 1969.
- N. R. Jennings, J. Corera, I. Laresgoiti, E. H. Mamdani, F. Perriolat, P. Skarek, and L. Z. Varga. Using archon to develop real world dai applications for electricity transportation management and particle acceleration control. *IEEE Expert*, 11(6) :60–88, 1996.
- N.R Jennings, J. Corera, I. Laresgoiti, E. H. Marndani, F. Perriolat, P. Skarek, and L.Z. Varga. Using archon to develop real-word dai applications for electricity transportation management and particle accelerator control. *IEEE Expert*, 11(6), 1996.
- C. Jonquet, P. Dugénie, and S. A. Cerri. Intégration orientée service des modèles grid et multi-agents. In *14èmes Journées Francophones sur les Sys-*

-
- [Jen93] N. R. Jennings. Commitments and conventions : The foundation of coordination in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 8(3) :223–250, 1993.
- [JG02] B. Jiang and H. R. Gimblett. An agent-based approach to environmental and urban systems. *Geographic Information Systems*, pages 171–189, 2002.
- [JGW98] A. Jaber, F. Guarnieri, and J.L. Wybo. Un système d'agents logiciels intelligents pour favoriser la coopération entre des systèmes d'aide à la décision dédiés à la gestion de crise. In *Dans actes des 6èmes JFIAD SMA 98*, 1998.
- [Joh01] S. Johnson. *Emergence : the connected lives of ants, brains, cities and software*. pinguin books, 2001.
- [Kü75] R. Kühne. Fixpunkte positiver operatoren in kb-räumen. *KB-Räumen. Math. Nachr.*, 65 :259–280, 1975.
- [Kan12] J.D. Kant. Modélisation pour les sciences humaines et sociales, 2012.
- [Kle03] A. Kleppe. *Software Language Engineering : Creating Domain-Specific Languages Using Metamodels*. Addison Wesley, 2003.
- [Laa00] A. Laaribi. *SIG et analyse multicritère*. Paris, Éd. Hermes Science Publications, 2000.
- [Lam78] L. Lamport. Time, clocks and the ordering of events in a distributed system. *Communications of ACM*, 21 :558–564, 1978.
- [Lau91] R. Laurini. Science and complexity. *Facets of Systems Science*, 7 :449–456, 1991.
- [Lau94] R. Laurini. les systèmes d'information pour la gestion des villes. *données urbaines*, 25 :45–50, 1994.
- [Lea09] N. Leach. Swarm urbanism. *Architectural Design*, 79(4) :56–63, 2009.
- [LeM99] J. L. LeMoigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod, 1999.
- [Len94] C. Lenay. Introduction. *Revue internationale de systémique*, 8, 1994.
- [Lin06] K. E. Lindenschmidt. The effect of complexity on parameter sensitivity and model uncertainty in river water quality modelling. *Ecological Modelling*, 190 :72–86, 2006.
- [Lou09] T. Louail. De la géométrie des réseaux viaires à l'organisation spatiale intra-urbaine : une approche de la comparaison des formes de villes par la simulation à base d'agents. *Revue Internationale de Géomatique*, 19 (4) :443–469, 2009.
- [Low64] I. S. Lowry. *A Model of Metropolis*. The Rand Corporation, 1964.
- [Luzaux and Ruault 2008] D. Luzaux and J.R. Ruault. *Ingénierie des systèmes de systèmes - concepts et illustrations pratiques*. Hermes Science, 2008.
- [Müller 1996] J.P. Müller. The design of intelligent agents - a layered approach. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1177, 1996.
- [Müller 1997] J.-P. Müller. The design of intelligent agents. *LNAI*, 1177, 1997.
- [Müller 2002] J.P. Müller. *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes, Habilités à Diriger des Recherches*. PhD thesis, Université Montpellier II, 2002.

- [Mas65] P. Masse. *Le plan ou l'anti-hasard*. Gallimard, Paris, 1965.
- [MB98] M. Martin and F. Burel. Un projet de simulation sur les dynamiques de paysage en accord avec les distributions de populations animales — modéliser le mouvement des individus en environnement changeant — application au cas d'abax ater. In *In Modèles et Systèmes Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires (SMAGET'98)*, Clermont-Ferrand (France), October 1998.
- [MCD⁺08] N. Marilleau, C. Cambier, A. Drogoul, E. Perrier, JL. Chotte, and E. Blanchart. Multiscale mas modeling to simulate complex systems : A case study in soil science. In *In Simulation Modelling Practice and Theory*, pages 736–745, Allemagne, 2008.
- [MDA01] Model driven architecture, 2001.
- [ME05] E. Maillé and B. Espinasse. Du couplage de systèmes à l'intégration spatio-temporelle dans les systèmes d'aide à la décision spatiale. In *in : Cemagref, CABM-HEMA-SMAGET05*, pages 2–11, France, Mars 2005.
- [ME07] E. Maillé and B. Espinasse. Un cadre de modélisation pour la simulation de dynamiques spatiales complexes. In *in. Actes du Colloque SAGEO07, Rencontres Internationales de Géomatique*, pages 18–19, Clermont-Ferrand, Juin 2007.
- [MEH97] La grille des équipement socio-collectifs et guide de programmation des équipements socio-collectifs, 1997.
- [Meu04] T. Meurisse. *Simulation multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation*. PhD thesis, Université Paris 6, 2004.
- [MFT08] Delâge M., Le Néchet F., and Louail T. Accessim : modélisation et simulation d'accessibilité et d'inégalités géographiques dans la ville, 2008.
- [MGG05] J.P. Mano, M.P. Gleizes, and P. Glize. Résolution émergente et collective de problèmes par systèmes multi-agents : principes et applications. *Traitemet du Signal*, 22, 2005.
- [MHS05] M. Mernik, J. Heering, and A. M. Sloane. When and how to develop domain-specific languages. *ACM Computing Surveys*, 37 :316–344, 2005.
- [Mic04] F. Michel. *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. PhD thesis, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 2004.
- [Min61] R. Minami. An analysis of malthus's population theory. *Journal of Economic Behavior*, 1 :53–63, 1961.
- [MLCP06] N. Marilleau, C. Lang, P. Chatonay, and L. Philippe. An agent based framework for urban mobility simulation. In *PDP*, pages 355–361, France, 2006.
- [Moi05] A. Moine. Le territoire comme un système complexe. des outils pour l'aménagement et la géographie. In *Actes des Septièmes Rencontres de Théo Quant*, pages 1–11, France, Fevrier 2005.
- [Moi06] A. Moine. Le territoire comme un système complexe : Des outils pour l'aménagement et la géographie. *L'Espace géographique*, 2 :115–132, 2006.
- [Mor90] E. Morin. *Introduction à la pensée complexe*. E.S.F éditeur, 1990.
- [Mut69] R. F. Muth. *Cities and housing : the spatial pattern of urban resi-*

-
- idential land use.* University of Chicago Press, 1969.
- [MVD11] G. Morvan, A. Veremme, and D. Dupont. Irm4mls : the influence reaction model for multi-level simulation. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 6532 :16–27, 2011.
- [MY90] Y. Miyata and S. Yamaguchi. A study on evolution of regional population distribution based on the dynamic of self-organization theory. *Environ. Sci., Hokkaido University*, 13 :1–33, 1990.
- [NFC11] L. Navarro, F. Flacher, and V. Corruble. Dynamic level of detail for large scale agent-based urban simulations. In *Proceedings of AAMAS 2011*, pages 701–708, Taiwan, 2011.
- [NN96] H. S. Nwana and D. T. Ndumu. An introduction to agent technology. *BT Technol J*, 14 (4) :55–67, 1996.
- [NS71] A. Newell and H.A. Simon. *Human problem solving*. Englewood : Prentice Hall, 1971.
- [ON98] P. OBrien and R. Nicol. Fipa & mdash, towards a standard for software agents. *BT Technology J.*, 16(3) :51–59, 1998.
- [OT00] D. O’Sullivan and P.M. Torrens. Cellular models of urban systems. *Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata*, pages 443–459, 2000.
- [Pae72] J.H.P. Paelinck. Modèles urbains dynamiques : Etude critique. *Revue économique*, 23 :931–951, 1972.
- [Par09] J.J. Park. Ville contemporaine et lois de symmetrie, 2009. Thèse EPFL, no 4593.
- [Pau09] J.P. Paulet. *Géographie urbaine*. Armand Colin, coll., 2009.
- [PCGR10a] J. Perret, F. Curie, J. Gaffuri, and A. Ruas. Un système multi-agents pour la simulation des dynamiques urbaines. In *Proceedings of the Journées Franco-phones des systèmes multi-agents JFSMA 2010*, pages 203–211, Mahdia, Tunis, October 2010. Cepadues Editions.
- [PCGR10b] J. Perret, F. Curie, J. Gaffuri, and A. Ruas. Un système multi-agent pour la simulation des dynamiques urbaines. In *Actes des 18e Journées Franco-phones sur les Systèmes Multi-Agents, Cépaduès*, page 205–213, 2010.
- [Peg00] P. Y. Peguy. *Analyse économique des configurations urbaines et de leur étalement*. PhD thesis, Université Lumière Lyon2, 2000.
- [Per06] J. Perret. *Modélisation d’environnements urbains virtuels*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 2006.
- [Pie10] J.S. Pierre. La dynamique des populations et ses modèles, 2010.
- [Piv97] V. Piveteau. Prospective et territoire : apports d’une réflexion sur le jeu. *Espace géographique*, 26, 1997.
- [PK06] L. Parrott and R. Kok. Use of an object-based model to represent complex features of ecosystems. In *Proceedings from the Third International Conference on Complex Systems*, page 169–179, Berlin Heidelberg, 2006.
- [PM00] C. Poix and Y. Michelin. Simulation paysagère : un modèle multi-agents pour prendre en compte les relations sociales. *Cybergeo (Revue Européenne de Géographie)*, 116, 2000.
- [PMKP10] S. Picault, P. Mathieu, Y. Kubera, and E. Perrier. Padawan, un modèle multi-échelles pour la

- simulation orientée interactions. In *Actes des 18e Journées Francophones sur les systèmes multi-agents*, pages 193–202, Tunisie, 2010. [QDR05]
- [Pog10] J. C. Poggiale. Méthodes mathématiques pour l'étude de la complexité : application à des écosystèmes, 2010. Course presented during "Conférence COMMISCO Octobre 2010 1ère conférence modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes" Paris, France. [QGHL10]
- [Pou03] X. Poux. Les méthodes de scénarios. *Prospectives pour l'environnement. Quelles recherches*, pages 33–50, 2003. [Qui07]
- [PPK06] D. Pumain, T. Paquot, and R. Kleinschmager. *Dictionnaire La Ville et l'Urbain*, chapter Extraits du « Dictionnaire La ville et l'urbain ». Anthropos-Economica, 2006. [Ram06]
- [PR04] A. Pereira and L. P. Reis. Agent-based simulation of ecological models. In *In 5th Workshop on Agent-based SImulation*, 2004. [RCG06]
- [Pre03] C. Previl. Analyse multicritère et sig pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : vers une amélioration du processus décisionnel. *Cahiers de géographie du Québec*, 47(130) :35–61, 2003. [RG95]
- [Pum98] D. Pumain. Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain. *Cahiers de géographie du Québec*, 42 :349–366, 1998. [RGH⁺06]
- [Pum04] D. Pumain, 2004.
- [Pum06a] D. Pumain. Hierarchy in natural and social sciences. *Methodos Series*, 3, 2006.
- [Pum06b] D. Pumain. Systèmes de villes et niveaux d'organisation. *Mor-phogenèse. L'origine des formes*, pages 239–263, 2006.
- G. Quesnel, R. Duboz, and E. Ramat. Coupling of physical models and socials models : multi- modeling and simulation with vle. In *In Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management - SMAGET'05*, Paris, France, 2005.
- J. Quijano-Gil, G. Hutzler, and T. Louail. Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle. Éléments d'analyse des aspects multimevaux dans la simulation à base d'agents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 24 (5) :625–648, 2010.
- J. G. Quijano. *Modèles d'auto-organisation pour l'émergence de formes urbaines à partir de comportements individuels à Bogota*. PhD thesis, Université PARIS 6(France), 2007.
- E. Ramat. Introduction à la modélisation et à la simulation à évènements discrets. *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*, pages 87–103, 2006.
- F. Rossi and B. Conan-Guez. Theoretical properties of projection based multilayer perceptrons with functional inputs. *Neural Processing Letters*, 23 (1) :55–70, 2006.
- A.S. Rao and M.P. Georgeff. Bdi agents : From theory to practice. In *In Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, page 312–319, Menlo Park, California, 1995. AAAI Press.
- S. Rodriguez, N. Gaud, V. Hilaire, S. Galland, and A. Koukam. An analysis and design concept for self-organization in

-
- holonic multi-agent systems. In *In ESOA 06, workshop of AAMAS 06*, pages 15–27, Japan, May 2006. [San01]
- [RNS07] Feuille de route française « vers une science des systèmes complexes 2007» liste des grandes questions et des grands objets, 2007. [San04]
- [Roy85] B. Roy. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, Economica, 1985. [San06]
- [RSD10] F. Rebaudo, J. F. Silvain, and O. Dangles. L'approche multiagents pour modéliser la dynamique de la biodiversité au sein des systèmes socio-écologiques complexes, 2010. Course presented during "Conférence COM-MISCO Octobre 2010 1ère conférence modélisation mathématique et informatique des systèmes complexes" Paris, France. [SC91]
- [RVO07] A. Ricci, M. Viroli, and A. Omicini. Give agents their artifacts : the a&a approach for engineering working environments in mas. In *In AAMAS'07 : Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1–3, New York, USA, 2007. [Sch81]
- [Saa84] T. Saaty. *Décider face à la complexité : Une approche analytique multicritère d'aide à la décision*. Paris : Entreprise moderne d'édition, 1984. [Sch11]
- [SAAG03] F. Sembolonia, J. Assfalg, S. Armeni, and R. Gianassi. Citydev an interactive multi-agents urban. *Computers environment and urban systems*, 28 :45–64, 2003. [Sei03]
- [Sab09] N. Sabouret. *Interactions sur le fonctionnement dans les systèmes multi-agents ouverts et Hétérogènes*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2009. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. [SET06]
- L. Sanders. *Les modèles en analyse spatiale*. Hermès science Lavoisier, 2001. [San04]
- L. Sanders, 2004. [San06]
- L. Sanders. Les modèles agent en géographie urbaine. *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, pages 151–168, 2006. [SC91]
- F. H. Sklar and R. Costanza. The development of dynamic spatial models for landscape ecology : a review and prognosis. *Methods in Landscape Ecology*, pages 239–288, 1991. [Sch81]
- M. Schtickzelle. Pierre-françois verhulst (1804-1849). la première découverte de la fonction logistique. *Population*, 3 :541–556, 1981. [Sch11]
- O. Scheffer. *Villes émergentes, villes mutantes : la théorie des systèmes complexes et de l'évolution appliquée à la modélisation urbaine*. PhD thesis, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE CREATION INDUSTRIELLE, 2011. [Seb09]
- N. Sébastien. *Distribution et Parallélisation de Simulations Orientées Agent*. PhD thesis, Université de La Réunion, 2009. [Sei03]
- Ed. Seidewitz. What models mean. *j-IEEE-SOFTWARE*, 20 :26–32, 2003. [SET06]
- J. Serment, B. Espinasse, and E. Tranvouez. Vers une infrastructure d'intégration pour le développement de systèmes d'aide à la décision environnementale. In *6ième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation –*

- [MOSIM'06] *MOSIM'06*, Rabat, Maroc, avril 2006. [Sti12]
- [Sie11] J. Siebert. *Approche multi-agent pour la multimodélisation et le couplage de simulations. Application à l'étude des influences entre le fonctionnement des réseaux ambients et le comportement de leurs utilisateurs*. PhD thesis, Nancy université, 2011. [Sud04]
- [Sil10] V. Silva. *Conception et évaluation d'un prototype de simulation de la morphogenèse urbaine par agents vecteurs multiéchelles*. PhD thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), 2010. [TABG08]
- [SIM90] J. SIMOS. Évaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation. Technical report, Lausanne, Presses Polytechniques et universitaires romandes (Coll. « META »), 1990. [TDZ08]
- [SM08] L. Sanders and H. Mathian. Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents. In *15èmes Journées de Rochebrune : expérimentation et systèmes complexes*, Mahdia, Tunis, Janvier 2008. In Denis Phan, editor. [TLAN01]
- [SPE07] Software process engineering metamodel specification, v2.0, final adopted specification, ptc/07-03-03, 2007. [TM03]
- [SPTD98] D. Servat, E. Perrier, J.-P. Treuil, and A. Drogoul. When agents emerge from agents : Introducing multi-scale view-points in multi-agent simulations. *MABS*, 1534 :183–198, 1998. [TW07]
- [ST02] N. Shahriari and C.V. Tao. Gis applications using agent technology : Symposium on geospatial theory. In *Processing and Application*, Ottawa, Canada, 2002. [VCW⁺99]
- S. Stinckwich. Introduction to meta-modeling for complex system, 2012. Course presented during "Programme Doctoral International" Paris, France. [Bra04]
- Braubach L. Pokahr A. Lamersdorf W. Sudeikat, J. Evaluation of agent-oriented software methodologies - examination of the gap between modeling and platform. *Agent-Oriented Software Engineering V*, 3382 :126–141, 2004. [Tur08]
- B. Turkienicz, G. Alves, B. Bellaver, and P. Grazziotin. Interactive geometric simulation of 4d cities. *International Journal of Architectural Computing*, 6 :79–95, 2008. [Tre08]
- J.P. Treuil, A. Drogoul, and J.D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents, Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Collection : Sciences Sup, 2008. [Atk01]
- A.J. Tatem, H.G. Lewis, P.M. Atkinson, and M.S. Nixon. Super-resolution target identification from remotely sensed images using a hopfield neural network. *Geoscience and Remote Sensing*, 39 (4) :781–796, 2001. [Tol03]
- A. Tolk and J. A. Muguiria. The levels of conceptual interoperability model. In *In 2003 Fall Simulation Interoperability Workshop*, Orlando, Florida, Septembre 2003. [Tin07]
- R. Tinker and U. Wilensky. Netlogo climate change model, 2007. [Voi99]
- A. Voinov, R. Costanza, L. Wanger, R. Boumans, T. Villa, F. and Maxwell, and H. Voinov. Patuxent landscape model : integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling and Software*, 14 :473–491, 1999.

-
- [VD02] D. Vanbergue and A. Drogoul. Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *Actes des 6ème Journées CASSINI*, pages 95–112, 2002.
- [Vil01] F. Villa. Integrating modelling architecture : a declarative framework for multi-paradigm, multi-scale ecological modelling. *Ecological Modelling*, 137 :23–42, 2001.
- [Wad02] P. Waddell. Urbansim : Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning, university of washington. *Journal-american planning association*, 2002.
- [WB71] J. Weber and D. Bailly. Prévoir c'est gouverner. *Natures-Sciences et Sociétés*, 1 (1) :59–64, 1971.
- [Wila] U. Wilensky. Netlogo.
- [Wilb] U. Wilensky. Netlogo plant growth model.
- [Win61] L. Wingo. *Transportation and urban land – Resources for the future*. John Hopkins, 1961.
- [WJ95] M. Wooldridge and N. R. Jennings. Intelligent agents : theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10 (2) :115–152, 1995.
- [WJK00] N. R. Wooldridge, Jennings, and D. Kinny. The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents Multi-Agent Sys.*, 3(3), 2000.
- [WMWG09] B. Weber, P. Muller, P. Wonka, and M. Gross. Interactive geometric simulation of 4d cities. *Computer Graphics Forum*, 28(2) :481–492, 2009.
- [WOO07] D. Weyns, A. Omicini, and J. Odell. Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14 :5–30, 2007.
- [WQ13] Z. Wensheng and L. Qiang. Complexity and dynamic modeling of urban system. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 3 :440–444, 2013.
- [Zac06] G. Zacharewicz. *Un Environment G-DEVS/HLA : Application à la Modelisation et Simulation Distribuée de Workflow*. PhD thesis, Univ. Aix-Marseille III, 2006.
- [ZKP00] B. Zeigler, D. Kim, and H. Praehofer. *Theory of modeling and simulation : Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press, 2000.
- [ZO86] B. P. Zeigler and T. I. Oren. Multifaceted, multiparadigm modeling perspectives : tools for the 90's. In *In WSC '86 : Proceedings of the 18th conference on Winter simulation*, pages 708–712, New York, USA, December 1986. ACM. ISBN 0-911801-11-1.
- [Zun] Q. Zunga. Coupler systèmes d'information géographiques et systèmes multi-agents pour modéliser les dynamiques de transformation des paysages. le cas des dynamiques foncières de la moyenne vallée du zambèze (zimbabwe). *Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*, 25 :193–206.

Résumé

Dans ce travail, nous présentons une approche de couplage de modèles orientée agent pour la modélisation des systèmes complexes spatiaux. L'idée principale est d'utiliser l'espace comme medium d'interaction entre les modèles à coupler pour leur permettre de coexister et d'interagir conformément à un ensemble de règles qui régissent ces interactions. En jouant le rôle de facteur de couplage, l'espace permet aux agents chargés du couplage d'échanger des données et nous permet d'observer les résultats concrets du couplage des différents modèles constituant le système complexe spatial étudié. Cette approche est composée d'une méthodologie et d'un métamodèle de couplage

orienté-agent. Notre métamodèle est basé sur une architecture organisationnelle (AGRE) et de type holonique qui prend en considération la spécificité, l'autonomie et l'échelle de calcul de chaque modèle. Cette notion de holon nous permet de gérer l'hétérogénéité des formalismes et des échelles spatio-temporelles des modèles. En effet, l'hétérogénéité spatiale est gérée par la décomposition des agents de collecte et de spatialisation jusqu'à atteindre le niveau d'abstraction souhaité. Ces agents peuvent passer d'un niveau à l'autre en adaptant l'échelle spatiale de l'espace à l'échelle spatiale du modèle grâce à des fonctions de conversion. L'hétérogénéité temporelle est gérée par un agent de temps qui permettra de calculer la future date d'exécution du modèle et un agent scheduler qui se chargera de l'ordonnancement de ces dates sur l'échelle de temps de la simulation. Nous prenons le système urbain de Métouia (Tunisie), comme exemple de système complexe spatial à étudier pour répondre aux besoins des urbanistes en terme d'aide à la décision en aménagement et tester notre approche de couplage coupling4modeling.

Mots-clés: modélisation des systèmes complexes spatiaux, couplage de modèles hétérogènes multi-

Abstract

In This work we present an agent-based approach for coupling models in the context of complex spatial systems. The main idea of our approach called Coupling4Modeling is the use of the space as a medium of interactions between the coupling agents to allow them to co-exist and interact according to a set of rules that govern these interactions. By playing the role of coupling factor, space allows coupling agents to exchange data and to observe the results of pragmatic coupling of different models constituting the studied spatial complex system. This approach consisting in a methodology and an agent-oriented metamodel of coupling. Our metamodel is based on an organizational (AGRE) with holonic architecture that takes into consideration the specificity, autonomy and the calculation scale of each model. This notion of holon allows us to manage the heterogeneity of formalisms and spatio-temporal scales of models. In fact, spatial heterogeneity is managed by the decomposition of the collector and the interpreter agents until reaching the desired level of abstraction. These agents can move from one level to another by adapting the spatial scale of the space to the spatial scale of the model through conversion functions. The temporal heterogeneity is managed by a time agent that will calculate the future date in the execution of the model and a scheduler agent that will schedule these dates following the time scale of the simulation. We take the urban system of Metouia (Tunisia) as an example of spatial complex system, to study with details and to test our coupling4modeling approach. The main goal is to meet the needs of urbanists in terms of decision support in urban planning and to test our coupling approach coupling4modeling.

Keywords: modeling of spatial complex systems, coupling of heterogeneous multiscale models, agent oriented methodology and metamodel

