

**UNIVERSITÉ D'ÉVRY-VAL-D'ESSONNE
U.F.R. SCIENCES FONDAMENTALES ET
APPLIQUÉES**

THÈSE

présentée pour obtenir

le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ d'ÉVRY

Spécialité : INFORMATIQUE

par

Thomas LOUAIL

Sujet : **Comparer les morphogenèses urbaines en
Europe et aux Etats-Unis par la simulation
à base d'agents — Approches multi-niveaux
et environnements de simulation spatiale.**

Soutenue le DD MM 2010 devant le jury composé de :

Alexis DROGOU	<i>Rapporteur</i>
Amal EL FALLAH SEGHRUCHNI	<i>Rapporteuse</i>
Anne RUAS	<i>Rapporteuse</i>
Frédéric AMBLARD	<i>Examineur</i>
Jean LATERASSE	<i>Examineur</i>
Anne BRETAGNOLLE	<i>Encadrante</i>
Guillaume HUTZLER	<i>Encadrant</i>
Jean-Louis GIAVITTO	<i>Directeur de la thèse</i>
Denise PUMAIN	<i>Directrice de la thèse</i>

Table des matières

Table des figures	iii
1 Motivations et contributions	1
1 Introduction	1
2 Organisation du manuscrit	4
3 Contributions	8
4 Une collaboration interdisciplinaire	10
2 Simulation informatique et géographie urbaine	13
1 Révolution théorique de la géographie et grands courants de modèles	14
2 Système-ville et systèmes de villes	22
3 Simulation urbaine dynamique et sans agents	27
4 Simulation urbaine dynamique, spatiale et à base d’agents	40
5 Illustration : Accessim	56
3 Formes et morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis	67
1 Des formes urbaines	68
2 Formes urbaines en Europe et aux Etats-Unis : constats	71
3 Morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis : hypothèses	78
4 Questions abordées par simulation	89
5 Méthodologie	90
4 Simuler les morphogenèses des systèmes de villes	99
1 Préambule : entrée dans le projet Simpop2 et calendrier des réalisations	101
2 Aspects informatiques de Simpop2	104
3 Expérimentations avec l’application Europe	115
4 Mécanismes spécifiques pour l’application Etats-Unis	118
5 Expérimentations avec l’application Etats-Unis, et généralisation	122
6 Outils d’exploitation existants	125
7 Nouveaux outils d’exploitation	131
8 Conclusions du chapitre	143
5 Simuler les morphogenèses des villes	147
1 Des questions de modélisation	149
2 simpopNano, un modèle long-terme de ville en développement	157
3 Réalisation	160
4 Instanciation des règles	163
5 Démarche et outils pour l’expérimentation	169
6 Expérimentations	171

7	Conclusions du chapitre	185
6	Aspects multi-niveaux dans les simulations à base d'agents	187
1	Des questions en suspens...	187
2	Multi-échelles ou multi-niveaux ?	192
3	Deux exemples de simulation multi-niveaux à la loupe	194
4	Simpop3 : simuler les morphogenèses urbaines aux niveaux inter- et intra-urbain simultanément	200
5	Vers des organisations multi-agents multi-niveaux	203
6	Conclusions du chapitre	205
7	Conclusion générale	207
1	Bilan de la contribution	207
2	Limites et poursuites	211
3	Perspectives	211
	Table des matières du document	233

Table des figures

2.1	Carte de Minard figurant les pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie (1812-1813)	17
2.2	Deux cartes mentales de l'Europe	18
2.3	Représentations du modèle de Von Thünen et de Christaller	19
2.4	Evolution de Nîmes et Montpellier au sein de la hiérarchie des villes françaises	26
2.5	Représentation des flux d'un système simple de Forrester	29
2.6	Les classes d'automates selon Tobler	35
2.7	Voisinage géographique considéré dans [WE93]	37
2.8	Evolution de l'attractivité avec la distance dans [WE93]	37
2.9	6.10 ²⁷ -ème génération d'un motif de <i>Life</i> calculé efficacement par <i>HashLife</i>	44
2.10	Composantes d'un modèle à base d'agents	50
2.11	Niveaux d'organisation spatiale intégrés dans <i>Accessim</i>	59
2.12	Diagramme d'activités d'une itération d' <i>Accessim</i>	60
2.13	Connaissance accumulée sur le tableau noir d'un quartier dans <i>Accessim</i>	61
2.14	Types de réseaux viaires utilisables dans <i>Accessim</i>	62
2.15	Séance de jeu avec des enfants lors du salon de géomatique 2008	63
2.16	Evolutions comparées des stocks de deux services	64
3.1	Trois niveaux d'organisation du fait urbain	69
3.2	Courbes rangs-tailles des systèmes de villes européen et états-unien.	73
3.3	Réseaux viaires des villes de Phoenix et Milan	75
3.4	Emprises spatiales d'Atlanta et Barcelone	76
3.5	La densité moyenne de population dans 49 aires métropolitaines mondiales	77
3.6	Evolution de la densité de population en fonction de la distance au centre dans trois villes européennes et trois états-uniennes	78
3.7	Différences entre approches <i>from scratch</i> et <i>data driven</i>	94
4.1	Chronologie des activités des projets Simpop successifs	103
4.2	Diagramme des classes de <i>Simpop2</i>	107
4.3	Interface de l'éditeur d'équations du <i>Navigateur Simpop</i>	114
4.4	Les applications de <i>Simpop2</i>	115
4.5	Trames spatiales simulée et observée de l'Europe en 2000	117
4.6	Progression historique observée du front pionnier états-unien	118
4.7	Localisations des gisements associés aux fonctions CYCLE dans l'application E.-U.119	
4.8	Dictionnaire imbriqué utilisé pour représenter l'avancée d'un front pionnier	121
4.9	Les semis de villes observé (en 2000) et simulé par <i>Simpop2</i> (pas de temps final) pour les Etats-Unis.	123
4.10	Gisements associés aux cycles d'innovation pour l'application Afrique du Sud	124

4.11	Semis des villes sud-africaines observé et simulé.	124
4.12	Diagramme entités-relations des concepts de l'expérimentation <i>in silico</i>	126
4.13	Interface graphique du Navigateur Simpop	127
4.14	Interface du Navigateur Simpop en phase d'analyse d'une simulation	128
4.15	Interface du <i>front-end</i> QGIS au SIG GRASS, lors de l'ouverture d'une table contenant les données d'une simulation géo-référencée de l'application Etats-Unis de Simpop2.	134
4.16	<i>Snapshots</i> du wiki d'expérimentation après ajout par un robot <i>Python</i> d'éléments de rapports de simulation, élaborés avec <i>R</i> et à partir de données issues dans la base de données spatiale.	136
4.17	Rangs-tailles pour toutes les dates d'une simulation Etats-Unis sur la période 1650-2000. Généré par un script <i>R</i> , cet important élément de rapport illustre l'intérêt d'une transition vers <i>R</i> , et de constructeurs d'éléments de rapports qui peuvent être orchestrés par un script <i>python</i>	138
4.18	Arbre correspondant à l'instruction <i>group-by ((plot-y population per-x-rank (1,min) in-space (cities, 10000)), date)</i> . Cette instruction trace, à raison d'une courbe pour chaque date de la simulation, l'évolution de la population des 1.000 premières villes comme une fonction de leur rang dans la hiérarchie.	139
4.19	Principe du calibrage automatique de modèle par des algorithmes génétiques . .	141
4.20	Interface graphique des algorithmes de calibrage	142
4.21	Page d'accueil du site web Simpop.	143
4.22	Les composants d'un nouvel environnement de simulation pour les applications du modèle Simpop2 et d'autres modèles de simulation (issu de [Rey09]).	146
5.1	Exemple de profil d'évolution de la composition fonctionnelle de la ville au cours du temps dans <i>simpopNano</i> . Des profils d'évolution des taux d'importance des fonctions urbaines sont déterminés avec les géographes, et sont plaqués sur un profil-moyen d'évolution de population sur la période 1800-2000.	151
5.2	Graphes théoriques des réseaux viaires de la ville états-unienne et de la ville européenne	154
5.3	Principe des scores évaluant la qualité des développements simulés	156
5.4	Capture d'une exécution en mode graphique du modèle	169
5.5	Evolution au cours du temps des effectifs des fonctions urbaines	173
5.6	Répartition des fonctions urbaines entre quartier central et quartier connexe. . . .	174
5.7	Evolution des densités dans la ville européenne pour le plus mauvais développement simulé	178
5.8	Evolution des prix dans la ville européenne pour le plus mauvais développement simulé	179
5.9	Evolution des densités dans la ville américaine pour le plus mauvais développement simulé	180
5.10	Evolution des prix dans la ville américaine pour le plus mauvais développement simulé	181
5.11	Evolution des densités sur les géométries européenne et états-unienne pour le meilleur paramétrage	183
5.12	Evolution des prix sur les géométries européenne et états-unienne pour le meilleur paramétrage	184
6.1	Diagramme des interactions entre niveaux dans SIMULBOGOTA	196
6.2	Modélisation d'une tumeur à partir d'entités cellules et molécules	199

6.3	Introduction d'un modèle agrégé pour le coeur de la tumeur	199
6.4	Niveaux dans Simpop2	201
6.5	Niveaux dans simpopNano	201
6.6	Problème de l'articulation dans Simpop3	202
6.7	Articulation dynamique de Simpop2 et de simpopNano dans Simpop3	203
6.8	Conception incrémentale d'un type de Simpop3	204

Chapitre 1

Motivations et contributions

1	Introduction	1
2	Organisation du manuscrit	4
2.1	Chapitre 2 : Simulation informatique et géographie urbaine	4
2.2	Chapitre 3 : Formes et morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis	5
2.3	Chapitre 4 : Simuler les morphogenèses des systèmes de villes	6
2.4	Chapitre 5 : Simuler les morphogenèses des villes	6
2.5	Chapitre 6 : Eléments d'analyse sur les aspects multi-niveaux dans les simulations à base d'agents	7
3	Contributions	8
4	Une collaboration interdisciplinaire	10

1 Introduction

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet **Simpop**. Celui-ci a débuté au début des années 1990 et vise à donner une transcription computationnelle d'une théorie évolutionnaire urbaine [Pum82, Pum97, Pum04] à l'aide de systèmes multi-agents (SMA). Le projet poursuit deux objectifs principaux :

1. tenter de reconstruire les dynamiques passées des systèmes de villes pour mettre à l'épreuve les processus explicatifs de l'évolution long-terme de ces systèmes que postule la théorie ;
2. tenter de prévoir leur évolution future, à un horizon de quelques décennies.

Simpop a déjà donné lieu à deux modèles, **Simpop1**, première application de la simulation multi-agents à la géographie [BGPM⁺96, SPM⁺97], puis **Simpop2** [SFM⁺05, PSB⁺09], une version enrichie permise par une plus grande puissance de calcul et l'utilisation de bibliothèques logicielles de plus haut niveau. **Simpop2** a permis d'étudier, au niveau des *systèmes de villes*, l'hypothèse de processus géographiques « universels » permettant d'expliquer les différentes dynamiques observées à travers le monde sur différents continents (notamment en Europe, aux Etats-Unis et en Afrique du Sud). Cette démarche comparative est appuyée par un modèle de simulation générique, encapsulant les processus supposés universels et communs à tous les

systèmes de villes du monde. Ce modèle a ensuite été instancié en plusieurs applications dédiées à chacun des systèmes étudiés, et encapsulant les processus spécifiques qu'on y observe. Ce modèle générique a été développé par B. Glisse dans le cadre de sa thèse [Gli07], et il a pu être calibré dès 2006 pour le système des villes européennes, par les géographes du laboratoire Géographie-Cités.

Notre entrée dans le projet s'est fait initialement pour adapter ce modèle aux Etats-Unis. Notre travail a permis de consolider les résultats acquis avec **Simpop2** et, partant de ces résultats, s'est ensuite porté de façon plus spécifique sur la modélisation informatique et la comparaison des morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis, à deux niveaux d'organisation spatiale habituellement dissociés dans les modèles urbains : les niveaux intra- et inter-urbains.

Le problème géographique

En comparant ces deux ensembles urbains, relativement semblables en termes de taille (population) et de dimension (superficie), que sont l'Europe et les Etats-Unis, on observe une inversion de tendance remarquable lorsqu'on se déplace le long de l'échelle spatiale :

- en Europe, les villes ont une forme circulaire plutôt condensée dans l'espace, tandis qu'au niveau du système des villes dans son ensemble, on observe un motif relativement étalé (environ 5.000 villes de plus de 10.000 habitants) ;
- c'est l'inverse aux Etats-Unis, pays de villes en damier très étalées dans l'espace, mais où le système des villes est très condensé (1.000 villes de plus de 10.000 habitants seulement). Il y a par exemple aux Etats-Unis des tailles de villes qu'on ne trouve pas en Europe : New-York a 28 millions d'habitants, Los Angeles 17 millions, une dizaine de villes ont plus de 10 millions d'habitants, tandis qu'en Europe seules Londres, Paris et la conurbation¹ Rhin-Rhur sont dans cette catégorie.

L'objectif de ce travail a été de fournir des outils permettant de s'interroger, par la simulation, sur les raisons potentielles de cette inversion, et tenter de répondre à des questions telles que :

- Pourquoi et comment, connaissant les contraintes historiques et économiques associées à la genèse de ces deux systèmes urbains, les mêmes processus géographiques ont-ils pu générer ces configurations inversées ?
- Est-il possible de reproduire, par la simulation, ces motifs spatiaux différenciés à chacun des niveaux, ainsi que cette inversion ?
- Un même modèle générique, incluant uniquement les processus postulés par la théorie, peut-il générer, suivant l'espace sur lequel il s'exécute, ces différences ?
- Si non, quels sont les processus spécifiques minimaux à intégrer pour reproduire ces différences de formes de villes et de systèmes de villes ?
- Quels types de simulation peuvent-ils être mis à profit pour simuler des dynamiques spatiales multi-niveaux ?
- Quels environnements de simulation sont nécessaires pour aborder ces questions ?

De **Simpop2** à **simpopNano**

Par rapport aux modèles **Simpop** précédents, ces questions nécessitent de prendre en considération un niveau d'organisation spatiale supplémentaire, celui de l'intérieur de la ville², et les acteurs qui lui « donnent forme ». Au cœur de notre travail, il y avait donc la nécessité

¹ensemble urbain constitué de plusieurs noyaux urbains dont les banlieues finissent par se rejoindre

²niveau intra-urbain

de construire un modèle qui permette d'étudier l'évolution, sur plusieurs siècles, des motifs de répartition à l'intérieur des villes, en termes d'emprise spatiale, de densité, et de valeur du sol, lesquels résultent des jeux de localisation des acteurs, le tout étant contraint par la trajectoire de la ville au sein du système des villes auquel elle appartient. La conception d'un modèle de ce type nécessite de prendre en compte des acteurs situés à différents échelons d'intervention, de modéliser des processus propres à chaque niveau d'organisation spatiale, mais aussi des processus à la frontière entre ces niveaux d'organisation, traduisant l'interdépendance de leurs évolutions.

Vers le couplage des niveaux

Ce manuscrit est centré sur la présentation de deux modèles à base d'agents, le premier dédié à l'étude des morphogenèses de systèmes de villes, le second dédié à l'étude des morphogenèses de villes. Mais pour s'attaquer à l'étude des raisons de ce renversement hiérarchique au passage entre les niveaux, ces deux modèles ne peuvent pas être étudiés indépendamment. Cette nécessité d'articulation de modèles pose la question des approches de calcul adaptés à la simulation de dynamiques complexes multi-niveaux. Des questions comme celles qui nous intéressent nécessitent de dépasser la dualité micro-macro en modélisation, et d'articuler des dynamiques collectives et spatialisées à différents niveaux d'organisation, au sein de modèles intégrés, autorisant le couplage entre causalités ascendantes et descendantes³.

Dans le cadre du projet **Simpop**, nous avons abordé cette question du couplage avec une démarche disciplinaire, en identifiant, dans les modèles géographiques, les éléments de modélisation qui font sens aux différents niveaux considérés (la ville ou la *fonction urbaine* par exemple) et qui sont donc susceptibles de servir de points d'ancrage à l'articulation recherchée. Mais au-delà du point de vue géographique, nous nous sommes attachés à amorcer une réflexion d'ordre méthodologique pour proposer une grille d'analyse des approches multi-niveaux utilisées en modélisation et en simulation, indépendamment des systèmes complexes qu'elles permettent de modéliser. Notre objectif informatique sur ce point est d'aller vers la proposition de concepts et d'outils facilitant la conception et l'implémentation de modèles multi-niveaux.

De la simulation à l'environnement de simulation

Ces nouveaux modèles sont par nature complexes et leur développement doit être accompagné de celui d'environnements de simulation permettant de les *exploiter intelligemment* et de manière *collective* et *collaborative*. Dans le cadre du projet **Simpop**, la démarche a en effet consisté à proposer que des processus géographiques « universels », lorsqu'ils étaient « plongés » dans des contextes, historiques, économiques et spatiaux différents, pouvaient conduire à des dynamiques et/ou états d'équilibre différents du système. Au-delà de la construction du modèle géographique et de l'implémentation du modèle computationnel, une part extrêmement importante du travail consiste alors à *calibrer* les modèle applicatifs afin de reproduire, de manière aussi fidèle que possible, les observables à disposition sur le système géographique étudié. Ce calibrage de modèles a souvent un coût important, et un des axes de notre travail a consisté à réfléchir à des démarches et des outils qui permettraient de l'amoinrir.

Cette question de l'outillage informatique [Hut10, Amb03, Dro00] et statistique [SM08, GM06] à mettre en œuvre pour calibrer, exploiter et évaluer [Amb03, ARB06] des modèles spatiaux complexes et à base d'agents est une question actuelle. Nous pensons quant à nous que l'innovation conceptuelle et technique en simulation sociale peut venir de la proposition de *traitements intelligents* autour du modèle : data mining, calibrage automatique, filtrage et ajustement

³on parle de *upward* et de *downward causations*, ou encore de processus *top-down* et *bottom-up*

statistique pour contrôler des trajectoires simulées, langages dédiés, production automatisée de résumés d'expériences, wikis dédiés à l'expérimentation collaborative.

2 Organisation du manuscrit

Les travaux présentés dans la suite du manuscrit se situent à la croisée de plusieurs domaines :

- la simulation informatique entité-centrée et les approches de calcul qui permettent d'articuler plusieurs niveaux d'organisation spatiale ;
- les environnements de simulation, dont le rôle est de permettre l'exploitation et l'expérimentation de modèles multiples ;
- l'étude des morphogenèses urbaines, et plus généralement les approches cherchant à reconstruire des dynamiques spatiales de long-terme par la simulation.

Ces travaux sont présentés dans cinq chapitres. Les paragraphes qui suivent donnent un plan analytique de chacun d'entre eux. Pour clore cette introduction, nous listons nos contributions en termes de formalisations, implémentations, applications et expérimentations, et faisons état des publications auxquelles ce travail a déjà donné lieu.

Nous avons privilégié une organisation faisant ressortir les modèles et leurs applications plutôt qu'une structure plus transversale, dont les chapitres auraient été centrés sur les méthodes et outils. En particulier, notre réflexion et nos réalisations en lien avec les environnements de simulation⁴ ayant été motivées par des manques observés sur l'exploitation du modèle **Simpop2**, il nous a semblé cohérent de grouper ce modèle, ses applications, ses expérimentations et ses outils d'exploitation (anciens et nouveaux) dans un seul et même chapitre (le 4). Cela présente malheureusement un inconvénient : ces nouveaux outils d'exploitation figurent dans le manuscrit avant les réalisations en rapport avec **simpopNano** (dans le chapitre 5), dont on pourra s'étonner qu'elles ne s'inscrivent pas à la suite de ces nouveaux outils. Mais c'est que chronologiquement, ces nouveaux outils d'exploitation ont été réalisés *après* **simpopNano** et ses propres outils. Il nous a semblé qu'il n'y avait pas de solution dominant toutes les autres. Devant l'obligation de trancher, nous avons opté pour une progression par modèles et donc aussi par « familles » de questionnements.

2.1 Chapitre 2 : Simulation informatique et géographie urbaine

Ce chapitre propose un historique rapide des approches simulatoires utilisées en géographie urbaine. Il commence par quelques rappels sur la révolution théorique, spatiale et quantitative qu'a connu la géographie au milieu du 20^{ème} siècle et qui a permis l'essor de la modélisation et de la simulation dans les années 1960. Une lecture en trois temps de la progression des modèles est proposée, et nous indiquons pourquoi il nous semble percevoir les prémices d'un nouveau temps, intégratif et *multi-niveaux*.

Un premier éclairage est alors jeté sur les objets géographiques de notre étude, les villes, à travers deux exemples de problématisation sur la ville, celui de sa délimitation dans l'espace et celui des déterminants de sa trajectoire sur le long-terme. La notion de systèmes de villes est alors introduite, via un exemple classique, la comparaison des trajectoires de Nîmes et de Montpellier au cours du 20^{ème} siècle, avant d'être précisée plus formellement.

Nous nous centrons alors sur la simulation urbaine, et proposons une grille d'analyse de modèles dynamiques. Nous passons au crible sept modèles spatiaux et dynamiques de ville

⁴fruits d'un travail fait en tandem avec Sébastien Rey

dont la réalisation s'est étalée entre 1952 et 1993, avant l'émergence de la simulation à base d'agents. Ce passage en revue de modèles importants dans l'histoire de la simulation des villes est suivi d'une tentative d'éclaircissement parmi des propriétés souvent utilisées pour qualifier les modèles : espace-centré, entité-centré, processus-centré et agrégé. Nous montrons que la transition du milieu des années 1990 vers les modèles à base d'agents est celle d'un raffinement progressif de la description, permis par la convergence d'avancées en termes de puissance de calcul, de langages, de disponibilité de données fines, et d'expérience accumulée. Nous rappelons que si les approches entité-centrées et les SMA ont de vrais avantages, la complexification des modèles qu'ils occasionnent pose des problèmes très difficiles à régler. Des raccourcis « naïfs » sur les approches entité-centrées sont alors mentionnés, et des contre-exemples leur sont opposés. Les raisons du succès de la simulation multi-agents en tant qu'approche de calcul donne alors lieu à une discussion où nous tentons de la mettre en perspective avec d'autres approches informatiques permettant de faire de la simulation entité-centrée. Nous mettons en évidence l'expressivité sociale et la malléabilité des notions au coeur des SMA, en donnant six exemples de questions d'analyse spatiale associées à des niveaux d'organisation très variés, et pour lesquelles une approche à base d'agents a été mise en œuvre avec succès. Nous tentons alors d'identifier plusieurs écoles actuelles de simulation en géographie, parmi lesquelles celle à laquelle nos travaux se rattachent.

Ce chapitre se conclue par une section relatant l'expérience *Accessim*, un modèle qui met à profit une approche multi-agents à la fois pour faire de la pédagogie sur des notions au coeur de la géographie (l'accessibilité, les mobilités régulières, motivées et engendrées par les localisations des services, la compétition spatiale), et pour faire de la recherche (explorer l'effet de différentes temporalités d'implantation de services sur leur compétitivité et sur la pérennité d'un ensemble de services de proximité).

2.2 Chapitre 3 : Formes et morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis

Ce chapitre est centré sur les questions géographiques ayant motivé la thèse. Il commence par des rappels généraux sur l'organisation multi-niveaux des systèmes urbains, et poursuit par un passage en revue des observations et des hypothèses associées aux différences entre systèmes urbains en Europe et aux Etats-Unis, au niveau de leurs systèmes de villes comme au niveau de leurs villes. Un étiquetage systématique de ces contrastes est proposé de façon à pouvoir formuler par la suite des relations causales à partir de ces hypothèses et observations. Nous montrons qu'il est possible, préalablement à leur implémentation, de proposer une première reformulation des observations et hypothèses recensées, à l'aide de quatre types de processus élémentaires (attraction, répulsion, arbitrage, contrainte globale).

Les implications que nous souhaitons tester par simulation sont alors plus explicitement formulées. Nous exposons dans la foulée les grandes lignes de notre méthodologie. A partir de données harmonisées sur les villes états-uniennes, et de la sollicitation de l'expertise des géographes, nous montrons comment construire des profils d'évolution moyens de villes sur toute la période historique que l'on souhaite aborder. Nous discutons alors du type de simulations à effectuer pour étudier formellement ces implications. Le principe d'une approche contextualisée et guidée par les données historiques est exposé, et nous expliquons pourquoi ce type de mécanisme n'interfère pas avec les relations causales dont nous souhaitons tester les conditions de réalisation. Les choix du langage et des bibliothèques utilisés pour implémenter les modèles sont discutés, ainsi que les contraintes d'expérimentation associés à notre projet simulateur.

S'ensuit une tentative de clarification et de mise en relation des notions d'évaluation, de

calibrage et de validation. Nous expliquons pourquoi l'évaluation des modèles construits doit nécessairement être multi-critères et continue, et indiquons comment certains aspects de cette évaluation (dont sa capacité à être calibré pour reproduire fidèlement les données) sont systématisables et abordables comme un problème d'optimisation.

2.3 Chapitre 4 : Simuler les morphogenèses des systèmes de villes

Ce chapitre présente des réalisations en lien avec le modèle **Simpop2**. Nous montrons comment l'ontologie du modèle multi-agents **Simpop2** traduit la théorie évolutionnaire urbaine. Nous mettons en évidence la pertinence de l'agent comme représentation informatique d'une ville.

Nous proposons alors une documentation de l'implémentation à base d'agents computationnels réalisée, et la façon dont les structures de données et de de contrôle du langage de programmation *Objective-C* ont été mises à profit pour programmer des agents à structure et à capacités d'interaction dynamiques. Nous expliquons en quoi une telle implémentation est supérieure à une implémentation plus directe et à base d'objets, y compris pour des projets de simulation où la structure du programme réalisant le modèle est souvent considérée comme accessoire. Nous discutons de la gestion du temps, mixte dans **Simpop2** et qui permet de programmer de façon expressive la gestion d'événements survenant dynamiquement pendant la simulation. Quelques optimisations de calculs spatiaux sont discutées, avant que nous exposions la programmation des fonctions urbaines, leur apparition et leur diffusion spatiale.

Les expériences menées avec l'application Europe et les résultats obtenus sont alors présentés. Nous arrivons alors à la programmation des mécanismes traduisant les observations et hypothèses faites spécifiquement au sujet des Etats-Unis. Nous montrons comment deux de ces mécanismes peuvent être implantés avec des dictionnaires imbriqués, une structure de données permettant d'exprimer aussi bien l'avancée d'un front pionnier que des contraintes spatiales encadrant la simulation de la diffusion spatiale des innovations. Les résultats obtenus sur l'application Etats-Unis, suite à un calibrage chronologique du développement et effectué « à la main », sont reproduits, et nous permettent de conclure sur l'*existence* de paramétrages des mécanismes proposés qui permettent de reproduire les différences hiérarchiques existantes entre systèmes de villes européen et états-unien.

La seconde partie de ce chapitre est dédiée aux outils utilisés pour expérimenter avec **Simpop2**. Nous disséquons les outils avec lesquels ont été menées les campagnes d'expérimentation présentées, et nous en proposons un audit. A l'aide d'un étiquetage systématique, nous identifions treize limites de ces outils et de la démarche d'expérimentation qu'ils favorisent. Nous présentons alors dans le détail quatre nouveaux outils qui, mis ensemble, permettraient à terme selon nous de dépasser ces limites. Ces outils sont encore à l'état de prototypes, mais leur pertinence a déjà pu être établie sur des exemples simples. Nous expliquons alors comment ces outils pourraient être agencés dans un environnement multi-agents d'exploitation générique de modèles de simulation spatiale.

2.4 Chapitre 5 : Simuler les morphogenèses des villes

Ce chapitre est le miroir intra-urbain du chapitre précédent, et est consacré au modèle **simpopNano**. Comme son nom l'évoque, **simpopNano** se veut une transcription des idées et de l'ontologie de **Simpop2**, à un niveau plus « petit » des territoires, le niveau intra-urbain, celui de l'intérieur de la ville et de ses acteurs. Il doit nous permettre de comparer par la simulation les développements sur le long-terme de villes en Europe et aux Etats-Unis.

Le chapitre commence par une reprise terme à terme des constats et hypothèses figurant dans l'implication principale que nous souhaitons tester par simulation. Nous montrons comment représenter informatiquement chacun de ces termes, en ancrant les solutions proposées dans la littérature sur la simulation des villes. Nous insistons notamment sur la nécessité de systématiser la comparaison des performances des paramétrages (capacité à reproduire les différences observées entre villes US et européennes), et sur la nécessité d'évaluer un développement, donc de quantifier la comparaison de trajectoires dans le temps et dans l'espace, afin d'automatiser et d'accélérer la recherche de phénomènes intéressants. Nous proposons des scores offrant un regard quantitatif et qualitatif sur la capacité des paramétrages à générer des développements différenciés entre géométries, à l'image des écarts observés entre les trajectoires de villes états-uniennes et européennes.

Nous exposons ensuite en détails la structure et la dynamique de **simpopNano**, un modèle long-terme de localisation de fonctions urbaines dans une ville décomposée en quartiers. L'approche modulaire suivie pour la conception aboutit à une proposition de décomposition du modèle comme un enchaînement séquentiel de neuf règles d'évolution indépendantes et paramétrables, ce qui permet de concevoir de façon autonome des formules et des mécanismes « concurrents » pour chacune de ces règles. Après avoir brièvement discuté de quelques aspects logiciels, de performance et de temps de calcul du programme implantant le modèle, nous proposons des premières instances pour chacune de ces règles.

Nous discutons alors de deux premières expériences comparatives menées sur le modèle, l'une avec des fonctions urbaines représentant des activités non-résidentielles uniquement, l'autre avec celles représentant les résidents uniquement. Outre qu'elles démontrent la fonctionnalité du modèle et de l'outil, ces premières expériences, « triviales » dans leurs analyses statistiques, montrent qu'il existe des paramétrages qui permettent de qualitativement bien reproduire les différences de répartition spatiale entre villes européenne et états-unienne, sans nécessairement invoquer autre chose comme différences que celles des topologies de leurs réseaux viaires. Le chapitre se conclut par une discussion sur les manquements actuels dans les expérimentations et les façons d'y remédier.

2.5 Chapitre 6 : Eléments d'analyse sur les aspects multi-niveaux dans les simulations à base d'agents

Ce chapitre, un peu plus court que les précédents, reprend et étend les résultats d'un travail, mené avec Guillaume Hutzler et Javier Gil-Quijano, de comparaison d'approches multi-agents pour simuler des dynamiques complexes en spécifiant et en articulant plusieurs niveaux d'organisation spatiale. Ce travail a donné lieu à deux publications.

Il commence par une synthèse des questions géographiques qui restent en suspens à l'issue des expérimentations présentées dans les chapitres précédents. Ces questions ne peuvent, selon nous, pas vraiment être résolues avec l'un ou l'autre des modèles précédents, pris isolément. Elles obligent à considérer *simultanément* ces niveaux intra- et inter-urbain et leurs entités associées, et de les mettre en relation dynamique en proposant une interface entre les deux. Nous donnons rapidement le goût de la solution retenue, avant d'entamer une réflexion plus large sur la prise en compte de multiples niveaux d'organisation simultanément dans un modèle. Sont alors envisagées plusieurs raisons pratiques à cette volonté d'intégration de niveaux. L'approche « classique » du multi-niveaux en simulation multi-agents, mais également d'autres paradigmes de calcul, sont alors disséqués, et nous expliquons en quoi cette approche est limitante. Nous envisageons des architectures de modèles plus riches, par le type de dynamiques qu'ils permettent de simuler, ce qui nous amène à proposer une distinction entre multi-niveaux faible et fort. La faisabilité

technique d'architectures répondant aux exigences de cette acceptation plus forte du terme multi-niveaux est alors prouvée, par l'examen en détails de trois modèles de simulation qui s'inscrivent dans ce courant *multi-agents et multi-niveaux*. La même grille d'analyse est utilisée pour déconstruire chacun de ces trois modèles, ce qui nous permet de bien mettre en évidence la façon dont chacun opérationnalise ces idées. L'un de ces trois exemple est **Simpop3**, et nous montrons comment sa réalisation du multi-niveaux par des SMA imbriqués, ou récursifs (un agent du SMA est lui même un SMA) permet de réaliser cette mise en relation dynamique entre **Simpop2** et **simpopNano**. Nous explicitons la négociation ontologique à la base de cette conception. Le chapitre se termine par la proposition d'une première ébauche de classification d'architectures multi-agents ayant en commun d'autoriser une prise en compte enrichie des connaissances des experts dans les modèles.

3 Contributions

Nos contributions lors de ce travail de thèse ont porté sur la formalisation des modèles urbains et leur traduction informatique en programmes de simulation, le développement des logiciels correspondants, les expérimentations par la simulation et la diffusion de ces travaux.

La formalisation.

- la conception avec A. Bretagnolle et C. Vacchiani-Marcuzzo des mécanismes spécifiques des applications Etats-Unis et Afrique du Sud de **Simpop2** traduisant les processus explicatifs des développements des systèmes de villes de type « pays neufs » (cf. chapitre 4 section 4) ;
- la proposition d'un étiquetage systématique des observations et des hypothèses associées aux villes et systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis, de façon à pouvoir exprimer synthétiquement et semi-formellement les implications à tester par simulation (cf. chapitre 3) ;
- la conception, avec A. Bretagnolle, F. Delisle et D. Pumain, de graphes théoriques de villes et d'indicateurs d'accessibilité associés qui tiennent compte des évolutions des vitesses de transports intra-urbaines sur la période 1800-2000 (cf. section 1.3 du chapitre 5) ;
- la conception, avec D. Pumain, A. Bretagnolle, J.-L. Giavitto et G. Hutzler, du modèle à base d'agents **simpopNano**, ce qui inclut la proposition originale de ré-utilisation de composants d'une ontologie inter-urbaine pour simuler des dynamiques intra-urbaines (cf. section 2 du chapitre 5) ;
- la proposition de premières instances pour les règles d'évolution de **simpopNano** (chapitre 5 section 4) et de scores pour quantifier la qualité des développements simulés (section 1.5) et pour les discriminer, étape préalable indispensable à l'automatisation du calibrage ;
- la conception, avec D. Pumain, de l'ontologie multi-niveaux du modèle **Simpop3** (cf. chapitre 6 section 4) ;
- l'audit de la démarche appliquée et des outils utilisés lors des campagnes d'expérimentation sur **Simpop2** Etats-Unis et Europe (cf. chapitre 4 section 6) ;
- la conception des nouveaux outils d'exploitation de **Simpop2** (encadrement du stage de M2 de S. Rey), et leur orchestration par un environnement d'exploitation de modèles spatiaux (cf. chapitre 4 section 7) ;
- la proposition d'une grille de classification d'approches multi-niveaux en simulation, résultat d'un travail effectué avec G. Hutzler et J.-G. Quijano (section 5 du chapitre 6) ;

- la conception, avec M. Delage, F. Le Néchet, H. Mathian et S. Rey, du modèle à base d'agents *Accessim* (chapitre 2 section 5).

Les développements. J'ai assuré les implémentations suivantes :

- le développement des mécanismes spécifiques aux applications Etats-Unis et Afrique du Sud, incluant le mécanisme de front pionnier, de diffusion des innovations sous contraintes spatiales, de fonction « mondiale » (avec B. Glisse), ensuite généralisés en des dictionnaires imbriqués (section 5 du chapitre 4) ;
- le re-développement et la documentation de paquetages entiers de la partie générique de *Simpop2*, notamment ceux liés à l'archivage des données (avec S. Rey), au mécanisme de marché d'échanges de fonctions, et à la diffusion spatiale des innovations ;
- le développement intégral du modèle *simpopNano* et de son logiciel compagnon (cf. chapitre 5 section 3) ;
- le développement avec F. Le Néchet de la première version d'*Accessim*⁵.

J'ai également assuré l'encadrement de stages :

- dans le cadre du projet *Simpop2* :
 - j'ai encadré avec Denise Pumain le stage de Sébastien Rey (M2 Carthagéo, 6 mois, [Rey09]) ;
 - j'ai assuré un suivi du stage de Clara Schmitt, encadrée par Denise Pumain et Anne Bretagnolle (ENSAP 3ème année, 5 mois, [Sch08]) ;
- dans le cadre du projet *simpopNano* :
 - j'ai encadré avec Guillaume Hutzler le stage d'Alexandre Monzie (ENSIIE 2ème année, 3 mois, [Mon09]) ;
 - j'ai assuré un suivi du stage de François Delisle, , encadré par Anne Bretagnolle (M1 Carthagéo, 4 mois, [Del08]).

Les expérimentations. J'ai participé aux campagnes de simulation sur les modèles *Simpop2*, *simpopNano* et *Accessim*, présentées avec leurs résultats dans ce manuscrit :

- sur *Simpop2* : participation aux campagnes d'expérimentation des applications Etats-Unis (pilotée par A. Bretagnolle) et Afrique du Sud (pilotée par C. Vacchiani-Marcuzzo) dont les résultats ont été publiés dans [BGL⁺07, BP08, BP10] (cf. chapitre 4) ;
- sur *simpopNano* : direction des premières campagnes d'expérimentation dont les résultats sont publiés dans le chapitre 5, avec participation de D. Pumain, C. Schmitt et S. Rey (cf. chapitre 5 section 6) ;
- sur *Accessim* : participation aux campagnes d'expérimentation (pédagogique puis à portée exploratoire), menées avec Matthieu Delage, Florent Le Néchet, Hélène Mathian et Sébastien Rey (cf. chapitre 2).

Les publications. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications et communications :

- des publications dans des revues [Lou09, GQHL10, DLNL08], et des actes de conférences nationales [PL09, GQHL09, DLNL⁺09],

⁵Les versions ultérieures, largement enrichies, ont été développées par F. Le Néchet et S. Rey.

- des communications dans des conférences internationales [BGL⁺08, LDLN⁺], des *workshops* internationaux [Lou07, Lou08b, Lou08a, LDLN⁺] et nationaux [BGL⁺07, LBG⁺], des écoles chercheurs CNRS [LS07], des rencontres de doctorants [Lou, ?], ainsi enfin que lors de manifestations scientifiques grand public (la maison Accessim à la *Fête de la Science* de l'Université Paris 7, et au salon de la géomatique du *Festival international de géographie de Saint-Dié-des-Vosges*, en 2008).

4 Une collaboration interdisciplinaire

Ce travail de thèse a été mené en immersion dans deux équipes, l'équipe LIS⁶ du laboratoire IBISC et l'équipe PARIS⁷ du laboratoire Géographie-Cités. Il n'est qu'un maillon d'une collaboration interdisciplinaire ancienne entre l'équipe PARIS et des équipes de physique et d'informatique spécialisées en simulation. Une telle collaboration interdisciplinaire ne va pas de soi.

Les écueils d'une collaboration faiblement couplée. La collaboration interdisciplinaire classique, lors d'un projet de simulation, définit bien les rôles : le modèle de conception est à la charge du thématicien, le modèle opérationnel du domaine est conjointement conçu par le thématicien et l'informaticien, et l'implémentation et la vérification du code sont de la responsabilité du seul informaticien [Meu04]. Le rôle de l'informaticien est important : il développe un programme qui permet de s'attaquer à des questions qui ne pourraient être abordées sans ce programme. Mais sur les résultats obtenus avec le modèle, il est *neutre* : ses réalisations ne sont qu'une traduction calculable du discours des experts du domaine simulé. Tout en étant indispensable à l'édifice, il ne peut être tenu pour premier responsable de la portée des résultats obtenus.

Ce mode de collaboration « faiblement couplée » est limitant pour les acteurs de la recherche interdisciplinaire, tant pour le thématicien, pour qui la perte du contrôle de « son » modèle lors de son opérationnalisation peut être source de frustration, voire de scepticisme quant à la correction du code si les simulations n'aboutissent pas aux résultats espérés, que pour l'informaticien également, qui reste confiné dans un rôle de développeur. De plus cette approche segmente la connaissance du modèle entre les partenaires ce qui rend d'autant plus difficile la validation.

Les écueils du refus de l'interdisciplinarité. Pour franchir ces barrières, les spécialistes peuvent investir dans l'apprentissage d'un langage de programmation généraliste et construire seuls leurs outils. Ils peuvent aussi collaborer avec des informaticiens en amont, indépendamment d'un problème spécifique, au développement de langages dédiés à leur domaine d'application, ce qui leur permettra ensuite de développer eux-mêmes des modèles avec un langage plus expressif. Certains auteurs argumentent que cette maîtrise de toutes les étapes du processus de construction du modèle informatique est indispensable pour véritablement le comprendre et réfléchir avec. Toutefois, la littérature récente nous semble mettre en exergue un déficit de systématisation dans la démarche expérimentale *in silico* de modèles entité-centrés en sciences sociales [ARB06, Amb03, Bom09].

Dans un mouvement inverse, il peut être tentant pour celui ou celle qui développe des méthodes de simulation, de développer de façon indépendante ses propres modèles en s'inspirant de modèles existants (par exemple pour les reprogrammer en suivant d'autres paradigmes

⁶Langages, Interactions, Simulation

⁷Pour l'Avancement des Recherches sur l'Interaction Spatiale

de programmation, de nouvelles métaphores, proposer des modèles plus minimalistes, etc.). Les reproches les plus courants faits à ces approches « indépendantes » incluent :

- la méconnaissance de l'historique des modèles du champ et des travaux existants ;
- la qualité insuffisante des données ;
- la facilité : en allant au plus simple, on formalise des effets déjà bien connus, « triviaux », et on ne résout pas les questions de recherche du moment fondées sur des observations plus fines ;
- la mobilisation d'un attirail technique lourd pour aboutir à des résultats dont la portée géographique est limitée ;
- l'utilitarisme, lorsqu'on vient chercher des *benchmarks* pour valoriser des méthodes sans vouloir sortir du cadre formel qu'elles imposent ;
- et bien sûr, la naïveté des modèles, qui est un danger d'autant plus grand en sciences sociales que les objets et concepts manipulés semblent familiers.

Une interdisciplinarité en immersion. Les écueils sont donc partagés et nous pensons qu'une solution à ces problèmes est le travail en *immersion* et en *interaction rapprochée* entre agents géographes et agents informaticiens, aussi bien aux niveaux théoriques que techniques. Tout en progressant dans l'acculturation réciproque, géographes et informaticiens sont tenus, au moins pour un moment encore, de collaborer étroitement pour concevoir des modèles utiles et *fertiles*.

J'espère au cours de cette thèse avoir réussi ce travail en immersion. Le travail présenté dans les chapitres suivants se révélera utile s'il permet à un informaticien de mieux comprendre les problématiques qui se posent aux géographes et s'il offre aux géographes quelques outils pour aborder ces questions.

Chapitre 2

Simulation informatique et géographie urbaine

1	Révolution théorique de la géographie et grands courants de modèles	14
1.1	La fin de l'exceptionnalisme en géographie	15
1.2	Collecter, quantifier, classer et cartographier l'information spatiale . . .	16
1.3	Capturer des configurations spatiales dans des formules	17
1.4	Reconstruire des structures spatiales avec des modèles dynamiques . . .	20
1.5	Vers un nouveau temps de la simulation géographique ?	21
2	Système-ville et systèmes de villes	22
2.1	La ville dans le champ des sciences	22
2.2	Les villes des géographes	23
3	Simulation urbaine dynamique et sans agents	27
3.1	Grille de classification des modèles présentés	27
3.2	Modèles <i>stocks and flows</i>	28
3.3	Des villes ouvertes et auto-organisées	30
3.4	Débuts de la microsimulation	32
3.5	Modèles <i>raster</i> des années 1960	33
3.6	Premiers automates cellulaires	34
3.7	Automates cellulaires contraints	36
3.8	D'autres approches de simulation des villes	38
3.9	Bilan des modèles présentés	39
4	Simulation urbaine dynamique, spatiale et à base d'agents	40
4.1	L'approche entité-centrée	41
4.2	Modélisation entité-centrée et modélisation espace-centrée	45
4.3	Difficultés posées par l'approche entité-centrée	46
4.4	Les systèmes multi-agents	47
4.5	Modèles urbains dynamiques avec agents	49
4.6	Objectifs poursuivis par la simulation urbaine	53
5	Illustration : Accessim	56
5.1	Éléments multi-agents d'Accessim.	58
5.2	Expérimentations	61

Motivations et objectifs. Pour tenter d'éviter les écueils relevés dans le chapitre introductif, notre travail commence par une mise à jour sur l'histoire des modèles en géographie, en particulier des modèles dynamiques de ville. Nous proposons donc d'éclairer la conception des modèles des chapitres suivants en la replaçant dans une revue, nécessairement sélective, de l'histoire de la simulation informatique des villes. Ce chapitre doit permettre :

- une introduction pour l'informaticien extérieur au champ de la modélisation urbaine ;
- de tenter un éclairage original sur une histoire bien connue des géographes ;
- de déconstruire quelques raccourcis trompeurs sur l'approche entité-centrée.

Plan du chapitre. Dans la section 1, nous retraçons d'abord les grandes lignes de la révolution théorique, spatiale et quantitative de la géographie, puis les contours des « grands courants » successifs de modèles formels conçus pour décrire et calculer des structures géographiques.

Dans la section 2, nous introduisons les notions de ville et d'urbain, en insistant sur la forte pluri-disciplinarité de ces objets et donc sur la multitude d'éclairages qui leur sont associés. Nous donnons des définitions géographiques de quelques objets clés de notre étude, et essayons de donner le goût de la problématisation en géographie urbaine, à travers le double exemple du problème de la délimitation spatiale d'une ville et du problème des déterminants de sa trajectoire (au sein de l'ensemble des villes) sur le long-terme.

La section 3 propose un état de l'art rapide de la simulation des villes avant l'arrivée des modèles entité-centrés exprimés à l'aide d'agents. Ces derniers, en très fort développement depuis la seconde moitié des années 1990, sont l'objet de la section 4.

Dans cette section 4, après avoir discuté de l'approche entité-centrée et l'avoir comparée à d'autres approches, nous mettons en avant ses difficultés. Nous revenons ensuite sur les raisons de l'intérêt porté par la géographie aux systèmes multi-agents (SMA). Nous proposons une grille d'analyse de modèles entité-centrés exprimés à l'aide d'agents, et nous présentons à travers cette grille plusieurs modèles issus de la littérature. Ceux-ci sont représentatifs de « grandes écoles » de simulation urbaine, et de la diversité de la granularité des entités que des agents servent à représenter.

Enfin dans la section 5 nous tâchons d'illustrer des dimensions de l'apport des SMA à une question de géographie urbaine, en présentant *Accessim*, un modèle développé pendant la thèse en collaboration avec M. Delage, F. Le Néchet, H. Mathian et S. Rey, et que nous avons présenté au *Festival international de Géographie de Saint-Dié-des-Vosges*¹ et à la *Fête de la Science*, en 2008.

1 Révolution théorique, spatiale et quantitative de la géographie et grands courants de modèles

La géographie a recours depuis longtemps à la théorisation et à la modélisation, à l'aide des mathématiques comme de l'informatique. Pour l'illustrer, nous proposons dans cette première section un résumé accéléré de l'évolution de la branche modélisatrice de la géographie, au cours du XX^e siècle, en mentionnant quelques uns des épisodes importants (section 1.1). Nous proposons ensuite de lire la chronologie de la modélisation quantitative en géographie comme un mouvement en trois temps :

1. d'abord des modèles *descriptifs* (des dessins, des cartes), centrés sur des cas particuliers, et des taxinomies (section 1.2) ;

¹où il a obtenu le 2^{ème} prix du concours de géovisualisation du salon de la Géomatique

2. ensuite des modèles mathématiques, des *lois*, mais statiques, phénoménologiques (section 1.3) ;
3. enfin des modèles génératifs cherchant à *reconstruire* de façon stylisée des structures et des processus spatiaux dynamiques (section 1.4).

Nous concluons cette section en expliquant pourquoi la période actuelle est, selon nous, celle d'une transition vers une nouvelle génération de modèles (section 1.5).

1.1 La fin de l'exceptionnalisme en géographie

Si la géographie toute entière fait depuis longtemps avancer son socle de connaissances par application de méthodes quantitatives (la mesure, *a minima*), les décennies 1950 et 1960 ont joué un rôle singulier dans l'histoire de la discipline, en étant le théâtre d'une véritable révolution. Le passage est celui d'une démarche d'étude des phénomènes dans leur singularité, au cas par cas (démarche qualifiée d'*idiographique*) à une démarche où l'accent est mis sur la recherche de similarités entre les phénomènes et sur la recherche de « lois spatiales » (démarche qualifiée de *nomothétique*) [Rob95, Ora09]. La volonté de rupture est telle que les tenants de ce changement paradigmatique n'hésitent pas alors à parler, pour se distinguer d'une géographie qu'ils qualifient de « classique », de *Nouvelle Géographie*. Cette révolution épistémologique « théorique et quantitative » est aussi une révolution « spatiale » par laquelle la question de l'espace se substitue, selon les diverses écoles préexistantes, à la question de la « région » ou à celle du « milieu ».

Cette rupture va bouleverser les modes de faire de la géographie. Pour [RCVMD09], c'est à ce moment que :

(...) le recours explicite aux concepts et aux raisonnements théoriques s'impose dans le cadre d'un examen critique de la discipline qui connaît une mutation radicale. L'accent est mis sur l'*analyse spatiale*, démarche hypothético-déductive, et sur la mise en évidence des processus et des formes d'organisation spatiale qui en résultent (Avant-propos, p.5).

Cette métamorphose fut initiée par des géographes travaillant aux Etats-Unis, puis s'est diffusée en Europe, d'abord en Grande-Bretagne et en Suède au début des années soixante, puis en France au début des années soixante-dix, et dans les autres pays. Ces auteurs renouvellent l'étude de questions classiques par la modélisation, et le transfert de formalismes mathématiques et de méthodes issues des sciences de la matière. Ce programme définit à la fois de nouvelles problématiques pour les géographes et de nouvelles méthodes pour s'y attaquer.

Pour citer quelques moments marquants de la chronologie de cette révolution, l'article de Fred Schaefer, *Exceptionalism in geography* [Sch53], un brulôt contre R. Hartshorne² et ce qu'il appelait l'« orthodoxie hartshornienne », fut également un plaidoyer pour la fin de l'étude de cas considérés comme uniques. Pour que la géographie ait une consistance et une place distincte parmi les sciences dit-il, il faut en faire la discipline de l'*espace*. L'ouvrage de William Bunge en 1962, *Theoretical geography* [Bun62], mit en forme ce projet et posa les fondations théoriques, délimita les objets et offrit les outils (en tête desquels la topologie). Un des grands formalisateurs de cette révolution fut David Harvey, avec son *Explanation in geography* [Har69], dans lequel il effectua une importante réflexion épistémologique. Enfin le manuel de Peter Haggett, *Locational analysis*³[Hag65], en proposant une histoire, une *grammaire formelle* de l'espace et un retravail sur des exemples, finit d'établir la « normalité » des nouvelles pratiques, qu'il fallait désormais traiter comme une branche à part entière de la géographie.

²président d'alors de l'Association des géographes américains

³traduit en français en « analyse spatiale »

Parmi les sujets qui ont été les plus mobilisés au départ de cette révolution scientifique figurent les transports et la ville. Ainsi, Edward Ullman, l'un des initiateurs du mouvement, qui a proposé au début des années 1950 que la géographie soit reconnue comme « la science de l'interaction spatiale », a travaillé avec prédilection sur la géographie urbaine et sur la géographie de la circulation. Avec le géographe allemand Walter Christaller [Chr33], Ullman [Ull41] a conçu une théorie de la ville comme lieu central et a encouragé le développement de la modélisation. Le symposium international de géographie urbaine de Lund en 1960 a marqué la consécration internationale de cette approche théorique et quantifiée de la ville. En cette même période, on observe un tel renouvellement des études urbaines que, selon Denise Pumain, on pourrait presque penser *a posteriori* que le champ est né à cette époque, tant les travaux se sont multipliés et diversifiés depuis [PPK06].

1.2 Collecter, quantifier, classer et cartographier l'information spatiale

La première étape d'une modélisation formelle correspond toujours à un choix d'observables et à la description du système au moyen de ces observables. Ce choix se fait en fonction de la question d'intérêt. Il ne s'agit pas encore à cette étape de relier les observables dans des formules, mais uniquement de simplifier en vue de représenter, de dessiner le système en y faisant apparaître ces observables.

La géographie étudie les phénomènes dans leur dimension spatiale, et cette première étape de représentation peut correspondre à *cartographier* le phénomène. L'histoire de la cartographie et de ses usages [Pal96] est très ancienne et très riche. Dès l'Antiquité, les hommes ont cherché à représenter leurs territoires et à mémoriser leurs itinéraires. La carte a eu, et continue à avoir, de nombreux usages : exploratoire et commerciale, politique et militaire, en permettant la délimitation et le contrôle des territoires, heuristique et pédagogique, ... Les cartes d'inventaire (simple localisation, sur des fonds de cartes topographiques ou des plans) sont très anciennes. Les premières cartes quantitatives et statistiques, de l'ingénieur Minard, remontent au milieu du XIX^{ème} siècle [Pal96]. Une de ses cartes est représentée sur la figure 2.1.

Bien sûr l'histoire de la carte⁴ n'est pas résumable au seul usage qui en a été fait en modélisation. La cartographie est bien plus ancienne que la modélisation quantitative en géographie. Et même en modélisation ses usages ont été multiples. En plus de son usage le plus classique, qui consiste à partir d'une réalité empirique complexe et de la simplifier pour la dessiner, la carte a dans le même temps servi comme *support de représentation* d'autres modèles (cartographie de flux prévus par le modèle gravitaire par exemple, cf. section 1.3), et elle a surtout aussi été source d'inspiration et matériau de départ pour une démarche de plus haut degré de schématisation, la chorématique [Bru80], qui tente de dégager à partir des raisonnements qu'exprime la carte des formes spatiales élémentaires, les *chorèmes*⁵ [DD01].

Bien conscients de ces réserves, il n'est pas interdit de voir également dans la carte-schéma la première étape de la compréhension d'un processus spatial. Avant de pouvoir capturer toute une gamme de phénomènes dans une formule, et avant de pouvoir proposer un schéma « mécaniste » permettant de les reconstruire, il faut d'abord être en mesure de bien décrire ce phénomène spatial. C'est également le cas en astronomie, où les cartes du ciel ont existé bien avant la proposition par Kepler de son système héliocentrique et des lois du mouvement des planètes [Bra99].

⁴Le lecteur intéressé par une introduction à l'histoire de la cartographie et de ses usages pourra consulter l'exposition multimédia de la BNF librement parcourable sur <http://expositions.bnf.fr/cartes/index.htm>

⁵de *choros* (lieu, espace), suffixé de façon à souligner la parenté avec les phonèmes

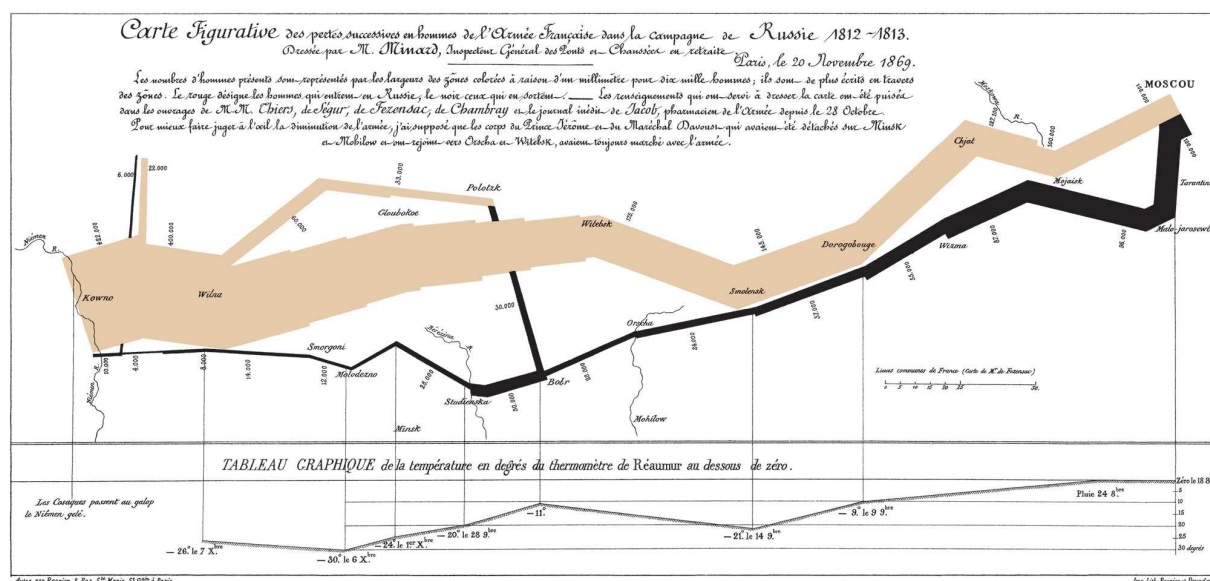


FIG. 2.1 – « Carte figurative des pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie 1812-1813, dessinée par M. Minard (...) ». La largeur de la zone colorée est proportionnelle au nombre d'hommes encore en vie à ce point de la progression.

La numérisation des cartes, la prolifération des capteurs et la multiplication récente des outils de visualisation ont modifié la relation des chercheurs à la carte, qui en quelques années est passée du statut de représentation synthétique difficile à construire, coûteuse et rare, à celui d'instrument de recherche manipulable à volonté. Mais tout comme un dessin peut être plus informatif qu'une photographie (le dessinateur mettant en évidence ce qui doit être remarqué), la carte n'a pas pour unique but d'être fidèle à la réalité (« à l'échelle »), son objectif étant avant tout de mettre en évidence des faits géographiques à travers des relations diagrammatiques (contiguïté, connexité, surface, obstruction, flux, ...).

Les cartes mentales (*mental maps*) sont un mode d'utilisation illustrant ce dernier point. Apparu dans les années 1960 avec Peter Gould, le procédé consiste à faire dessiner de mémoire à un individu une carte subjective d'un espace vécu. On demande au dessinateur d'y indiquer les localisations des lieux importants : artères principales, gare, mairie, commerces, etc. Ces cartes « perçues », lorsqu'elles sont confrontées à des cartes physiques ou inter-subjectives, permettent la mise en évidence des déformations induites par le réseau de transports, les pôles commerciaux, etc. [CR86] (cf. figure 2.2).

1.3 Capturer des configurations spatiales instantanées dans des formules mathématiques

Dans notre lecture en trois temps de la modélisation quantitative, le deuxième correspond à la réification formelle de la transition vers une démarche nomothétique, évoquée dans le premier point de cette section. La recherche de généralisations, de *lois spatiales*, conduit à chercher à inscrire de multiples configurations observées dans un schéma générique. Celui-ci est d'autant plus puissant qu'il « capture » d'autant plus de configurations existantes. Cela correspond à relier les observables choisies pour décrire et dessiner le système (1^{er} temps) dans des formules mathématiques. Ces modèles sont phénoménologiques, sans pour autant être dynamiques. Leur but est de comprimer les observations dans une ou plusieurs formules qui doivent permettre de

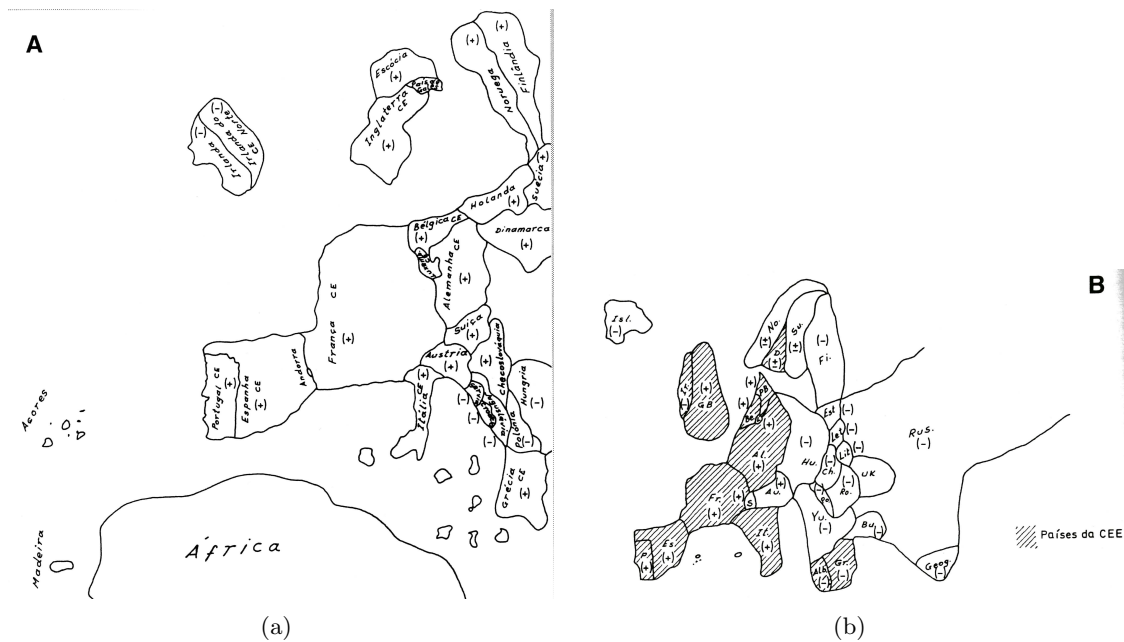


FIG. 2.2 – Deux cartes mentales de l'Europe réalisées par deux étudiants portugais. Dans les deux cas on peut remarquer que le Portugal représente plus d'un tiers de la péninsule ibérique mais aussi que l'Autriche touche la Méditerranée (!) (extrait de [CR86]).

reproduire les données, mais aussi de les prévoir sans passer par l'observation directe. Un tel modèle peut enfin permettre d'expliquer des régularités observées. Donnons trois exemples.

Les premières théories de la localisation. Elles cherchent à expliquer et prédire qui se localise où et pourquoi. En 1826 Von Thünen proposa un modèle (atemporel) de répartition des spécialisations agricoles autour d'une ville, en fonction de la distance au marché [VT26] (cf. figure 2.3(a)). Les modèles géométriques dessinés par W. Christaller dans l'exposé de sa théorie des lieux centraux [Chr33] (cf. figure 2.3(b)) sont un autre exemple de cette catégorie de modèles spatiaux mais statiques.

Par comparaison à la carte, analogique, le modèle de Christaller est logique : il encode avec des pertes en une seule carte l'information contenue dans une multitude de cartes. Cependant, si Christaller articule ses schémas, dans l'exposé de sa théorie, avec des causes explicatives de l'apparition de ces répartitions, son modèle en lui-même est statique, et n'intègre donc pas les processus qui engendrent dynamiquement ces structures spatiales régulières. En résumé, le modèle trace un cadre où inscrire une multitude d'organisations spatiales existantes, mais ne dit rien de leur genèse et de leur développement.

Le modèle gravitaire. Inspiré de la mécanique classique, il donne une prévision quantitative de l'intensité des échanges entre deux lieux en fonction de leurs masses (taille de la population ou autre) et de la distance qui les sépare :

$$I_{i,j} = k \times \frac{P_i \times P_j}{d_{i,j}^n}$$

La formule est à la fois causale, prévisionnelle et normative. Elle donne un instantané des échanges entre deux unités spatiales, sans expliquer ce qui se passe dans le temps. Elle capture

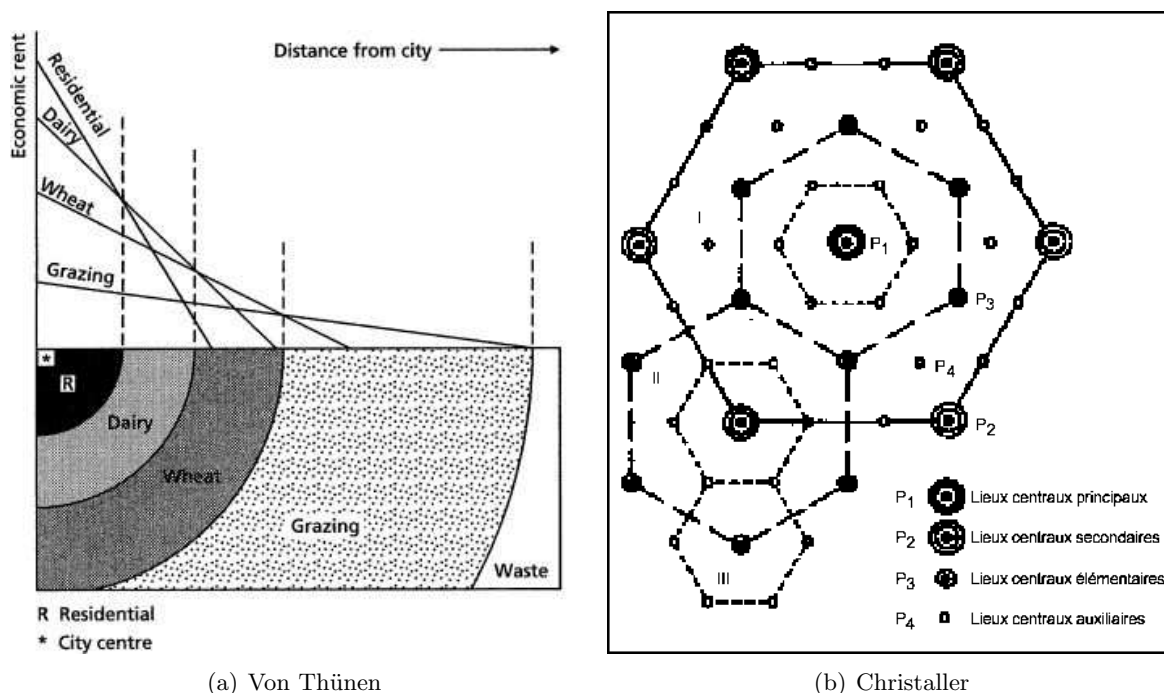


FIG. 2.3 – Représentations du modèle de Von Thünen et de Christaller

les données de terrain, et peut également prévoir une carte de flux. C'est une *loi spatiale* tirée de photos statiques, et qui permet de générer de nouvelles données à un instant précis.

Faisons un rapide aparté : F. Durand-Dastès rappelle qu'en géographie les modèles ont souvent été utilisés comme des *filtres* [DD01]. Un modèle est utile autant par ce qu'il permet de reproduire et d'expliquer que par ses *résidus*, i.e les phénomènes qu'il ne permet pas de rendre compte et les écarts entre prévisions et observations. Il illustre son propos en prenant comme exemple ce modèle gravitaire. Lorsque l'on compare la valeur prévue par le modèle avec la valeur observée du flux, la valeur prévue sert de *norme*. Si le flux observé est plus important que la norme, cela témoigne d'un effet privilégié, probablement lié à des infrastructures de transports, ou à une relation préférentielle historique entre ces deux lieux. Au contraire si la valeur est plus faible que la norme, cela témoigne d'un effet barrière, lié à une contrainte spatiale, humaine (une frontière par ex.) ou naturelle (une chaîne de montagnes par ex.).

Le modèle en lui-même n'explique pas pourquoi les échanges seraient inversement proportionnels à la distance entre les villes (ou à son carré, ou à une autre puissance), et proportionnels à la taille de leurs populations. Il le constate, et il a donc une valeur descriptive : la formule encode et condense des faits relevés sur le terrain. Cette formule a valeur de loi, on s'attend à ce que les nouveaux flux suivent la même loi, et si ce n'est pas le cas (si on n'est pas dans la norme), il y a une raison spécifique à trouver. Mais la valeur explicative est absente. On peut certes dire que le modèle est causal en disant que les variables dans une formule sont la cause du résultat (de la valeur calculée) : on retrouve la « causalité formelle » d'Aristote. Cette considération nous amène aux questions sur la nature de la preuve en géographie : « Qu'est-ce qu'une explication géographique ? » ou « Est-ce que expliquer c'est prédire ? », évidemment épineuses et sujettes à débat. Le modèle gravitaire a été utilisé comme un composant inclus dans d'autres modèles de plus grande envergure, comme celui de Lowry.

Le modèle de Ira Lowry. En 1964, Ira Lowry proposa le premier modèle « intégré » de l'organisation spatiale des activités humaines à l'intérieur d'une ville [Low64]. Il prenait en compte les ménages, les logements, les emplois de type industriel et de service. Il a été appliqué à la ville de Pittsburg aux Etats-Unis. Lowry essaya de prévoir la répartition des ménages et des bassins d'emploi dans une ville en fonction des évolutions économique et démographique, considérées comme exogènes et extérieures à celle-ci. D. Pumain explique dans [PPK06] que :

(...) le modèle calculait, sous des contraintes d'effectif données, quelle répartition de la population parmi un ensemble de zones s'ajusterait à une distribution donnée d'emplois de base, compte tenu également des emplois supplémentaires induits par cette population.

Il servit très longtemps aux aménageurs, puis comme référence pour la génération suivante de modèles. Ce modèle est souvent présenté [PSJS89, BT04] comme la dernière marche avant les modèles dynamiques, que nous considérons comme le 3^{ème} temps de notre lecture. En fait si ce modèle de Lowry est *thématiquement statique* (il cherche des mécanismes permettant de produire de façon réaliste une distribution spatiale pour une distribution économique à *une date donnée*), il est déjà *techniquement dynamique* : le modèle converge vers un équilibre, atteint par des *itérations successives*, chacune correspondant à ajuster les répartitions spatiales des emplois de services et celles des ménages⁶.

Ainsi c'est à partir des années 1960 que l'informatique se développe en géographie comme langage et support de modélisation. Désireux d'aller plus loin, les géographes vont « donner vie » à leurs modèles en y mimant le passage du temps.

1.4 Reconstruire des structures spatiales en développement avec des modèles dynamiques

If you didn't *grow* it you didn't explain it. (J. Epstein and R. Axtell, dans [EA96])

Ce troisième temps correspond au passage à des modèles dynamiques, plus explicatifs car « mécanistes » : leur ambition est justement de comprendre la *mécanique* des choses *dans le temps*, et de la reconstruire en *simulant le développement*. Cela correspond aux modèles qui cherchent à reconstruire des villes virtuelles qui présenteront des caractéristiques structurelles semblables à celles observées dans la réalité, ou bien à interpoler ou extrapoler le développement de villes réelles.

Historiquement, il est difficile d'isoler un modèle géographique pionnier dans cette catégorie qui fasse consensus, car certains spécialistes considèrent que, bien qu'a-temporel dans la forme, le modèle gravitaire est par exemple un modèle expliquant l'apparition d'une structure. Selon ce point de vue, le modèle gravitaire ne fait pas apparaître le temps parce que le facteur explicatif, génératif des flux, est la distance absolue entre deux lieux, et que celle-ci reste inchangée au cours du temps. Mais lorsque la distance est exprimée en temps ou en coût, elle devient fonction du temps (*i.e* des évolutions technologiques et de l'aménagement), et le modèle peut servir à analyser une évolution, un développement. De plus il y a eu au moins deux orientations de justification théorique du modèle :

1. l'une par l'application du principe de maximisation de l'entropie (Alan Wilson)
2. l'autre par simple raisonnement probabiliste et géométrie (voir Stouffer, *intervening opportunities*)

⁶Y.Guermond en a donné une présentation récente plus succincte, dans [Gue05], de même que D. Pumain dans [PPK06], entrée *Lowry*

Toutefois il ne s'agit pas d'un modèle de croissance d'une structure urbaine. Si l'on ne considère pas le modèle gravitaire comme un modèle dynamique, alors on peut dire que Torsten Hägerstrand, géographe suédois aux pratiques innovantes pour son époque, fut pionnier dans ce domaine. Dès le début des années 1950, il proposa un modèle dynamique *et* individu-centré, de diffusion spatiale d'innovations [Häg53]. Nous reviendrons plus en détails sur ce modèle, ainsi que sur plusieurs autres, dans la section 3.

Dans le domaine de la sociologie urbaine, les modèles bien connus de Schelling et de Sakoda sont des exemples de modèles dynamiques et génératifs. Au début des années 70, Schelling montra qu'il était possible de reconstruire des configurations socio-spatiales très ségréguées, qui mimaient de façon stylisée celles observées dans les villes américaines, sans supposer un comportement majoritairement ségrégationniste des habitants. Comportant une unique règle, très simple et à un seul paramètre K (un individu déménage si plus de $K\%$ de ses voisins ne sont pas issus du même groupe social/ethnique que lui, sinon il reste), appliquée en parallèle à un grand nombre d'entités figurant des ménages ou des individus, son modèle permet de générer des *clusters* socialement/ethniquement homogènes à un plus haut niveau d'organisation spatiale.

1.5 Vers un nouveau temps de la simulation géographique ?

Après ces trois grands temps de la modélisation des villes, il nous semble déceler l'amorce d'une nouvelle étape importante. En effet, certains auteurs voient dans les nouveaux outils (SIG, geolocalisation, cartographie web et 3D) et dans l'accès nouveau aux données spatiales qu'ils permettent, les déclencheurs d'une génération de modèles révolutionnaires car beaucoup plus fins, plus réalistes et plus opérationnels [BT04, Ben07, Axt07]. Nous partageons ce constat, mais nous pensons que les modèles ciblés par cette « nouvelle révolution » sont les modèles ciblant des dynamiques rapides, quotidiennes, etc. et cela du fait de la disponibilité de ces données fines uniquement pour des périodes très récentes. En revanche pour ce qui est des modèles *explicatifs* de l'évolution des territoires sur le long-terme, l'apport de ces technologies paraît pour l'heure beaucoup moins déterminante.

Il semble pourtant que, pour ces modèles long-terme également, un nouveau temps est en train de se faire jour. Il correspond à la construction de modèles qui, comme ceux de la « troisième génération », possèdent comme propriétés d'être dynamiques, génératifs, qui peuvent être potentiellement entité-centrés, à base d'agents (mais pas nécessairement), et qui dans le même temps cherchent à structurer et articuler de la connaissance à plusieurs niveaux d'organisation spatiale simultanément, où chacun des niveaux peut être modélisé comme une population d'entités interagissantes, et à relier ces niveaux pour les rendre inter-dépendants. Ces *modèles multi-niveaux* sont motivés par le désir de dépasser le cloisonnement des descriptions des phénomènes sociaux en termes de dynamiques à deux niveaux, *micro* et *macro*. Cette dualité *micro-macro* est appauvrissante, et particulièrement en sciences sociales, où un travail de définition des catégories existe depuis très longtemps (cf. l'histoire de la statistique [Des10]), bien plus ancien encore que les travaux de Durkheim et *a fortiori* que l'émergence de la pratique de la simulation. D'innombrables travaux ont depuis montré l'existence et le poids du rôle des nombreuses structures sociales dans les trajectoires des individus et donc dans celles des populations, ainsi que les effets des échelles d'observation et d'analyse et sur les variations de processus et de catégories associées. Ces constats amènent nécessairement au développement de la simulation multi-niveaux. Le développement de tels modèles, complexes, doit impérativement être accompagné par le développement d'*environnements de simulation intelligents*, qui permettent de raisonner sur ces multiples niveaux d'abstraction et d'évaluer ces modèles.

Ce nouveau temps de la modélisation nous semble être un prolongement permis par le croisement de multiples avancées, en particulier :

- la disponibilité à bas coût de moyens de calcul ;
- la dissémination de méthodes formelles et l'accès plus simple à la programmation et à la simulation informatique, résultat de plus de cinquante ans d'acculturation et d'appropriation des concepts et des outils informatiques ;
- l'accès à de nouveaux styles de simulation, de nouvelles approches de calcul.

Dans cette thèse les besoins multi-niveaux s'expriment dans la problématique géographique des liens entre le développement spatial interne d'une ville et sa trajectoire au sein du système des villes sur le long-terme. Nous reviendrons sur cette articulation dans le chapitre suivant et le chapitre 6.

2 Système-ville et systèmes de villes

2.1 La ville dans le champ des sciences

Une ville est un objet excessivement multidimensionnel et complexe, central pour de nombreuses disciplines, et à ce titre le champ des études urbaines est extrêmement large et diversifié. Recenser ces savoirs et ces questionnements sur la ville et l'urbain relève d'une démarche encyclopédique [PLBGB00, PPK06]. D. Pumain synthétise à grands traits les angles d'attaques disciplinaires sur l'objet-ville :

« Pour les historiens, les juristes, ou les spécialistes de sciences politiques, comme pour les premiers chroniqueurs urbains, la ville désigne une forme d'organisation politique des sociétés qui correspond à diverses formes de statut des personnes ou de l'appropriation d'un territoire. Du point de vue de la sociologie, la ville est aussi une forme d'organisation sociale qui privilégie l'innovation, grâce à l'interaction accrue par la proximité, autorisant une complexité croissante de la division sociale du travail. L'économie insiste sur le rôle de la ville comme productrice de richesse en ce qu'elle aide à réaliser des économies d'agglomération (profits liés à l'utilisation indivise d'équipements publics). Pour les géographes, la ville est un « système à l'intérieur d'un système de villes » (Berry, 1964) et représente l'organisation hiérarchisée du peuplement des sociétés à deux échelles, celle du territoire de la vie quotidienne (la ville) et celle du territoire du contrôle politique et économique (les réseaux de villes). Pour la démographie, la ville est un groupement permanent de population sur un espace restreint, c'est un contexte qui modifie les biographies individuelles et les comportements. » (entrée *Ville* dans [PPK06])

Cette diversité se retrouve bien sûr dans les modèles. Dans cette thèse, nous n'aborderons que des modèles de villes qui viennent de la géographie (et un peu de l'économie).

Mais avant de présenter des modèles, et afin de donner un aperçu de la problématisation sur la ville en géographie, nous nous arrêtons sur les deux problèmes cruciaux de (a) la délimitation d'une ville dans l'espace, étape préalable indispensable à (b) la comparaison des villes et de leurs évolutions dans le temps et la compréhension de leur fonctionnement en système.

2.2 Les villes des géographes

2.2.1 Des délimitations successives pour définir la ville

Pour étudier les villes, plusieurs définitions géographiques, spatiales, des villes ont été successivement proposées. D'abord morphologiques puis fonctionnelles, ces définitions viennent se substituer aux délimitations communales, héritières de l'histoire propre de chaque pays. Elles sont construites sur des critères statistiques et normés qui permettent de comparer plus significativement les évolutions des villes dans l'espace et dans le temps [BPP02]. Ces définitions elles-mêmes ont une histoire : elles se sont succédées, chacune a des manques et en appelle des nouvelles.

La ville-commune. La première définition est administrative : fait partie de la ville ce qui a été inclus dans la délimitation communale. Cette définition est arbitraire, dans le sens où elle dépend pour beaucoup de l'histoire du pays, du choix ou non de redéfinir les limites communales au fur et à mesure de l'urbanisation et du développement des banlieues de la ville-centre. En France par exemple, il n'y a pas de règles pour faire évoluer les communes, et la plupart n'ont pas évolué depuis 1792, même si des agrégations politiques comme les inter-communalités, les communautés d'agglomération, les communautés urbaines ont été créées pour se donner les moyens d'agir à des échelles territoriales élargies. Ces délimitations arbitraires ne permettent pas de raisonner et de comparer les villes. Il faut inclure dans la ville-centre l'ensemble des territoires sous son influence. A Marne-la-Vallée ou à Evry par exemple, des communes de plusieurs dizaines de milliers d'habitants, la polarisation parisienne domine encore largement.

L'agglomération urbaine. Pour s'affranchir de cet arbitraire des découpages administratifs, une première définition, morphologique et statistique, est celle des agglomérations urbaines. Une *agglomération urbaine* est un groupement de constructions bâties en continuité (en France séparées par moins de 200 mètres libres en terrain constructible) et abritant une quantité de population supérieure au seuil statistique qui définit le peuplement urbain (en France, 2000 habitants depuis 1856). Une agglomération urbaine est donc dans la majorité des cas pluri-communale. A l'entrée *Agglomération* de [PPK06], il est rappelé que

« (...) dès 1897, Paul Meuriot soulignait que l'agglomération constitue un cadre géographique plus pertinent que la commune pour mesurer et comparer l'importance des villes d'après la population et les activités qu'elles rassemblent, la diversité et le niveau des fonctions urbaines, le degré de complexité atteint par leur économie et leur société. »

Dans la pratique, plusieurs pays avaient de fait entériné la croissance morphologique des villes. En 1860, on a agrandi Paris en lui intégrant les communes adjacentes (Montmartre et Belleville notamment, en mordant sur un bout de Montrouge, etc.). Mais en Allemagne et en Italie par exemple, où la reconnaissance des prérogatives politiques aux échelons locaux est plus forte qu'en France, cette extension des limites communales s'est pratiquée plus fréquemment et depuis plus longtemps qu'en France [PPK06]. Le souci de rattraper le progrès spatial, morphologique de l'agglomération existe depuis très longtemps, mais en France la définition statistique officielle et normative n'est venue qu'en 1954, même si des études préalables avaient été entamées depuis 1942.

La faiblesse de ces définitions morphologiques est qu'elles ne rendent compte qu'imparfaitement du fonctionnement de la ville, et notamment des comportements spatiaux engendrés par l'amélioration des transports et l'augmentation des distances parcourables dans un budget-temps constant. Cela engendre des développements territoriaux qui, sans s'inscrire en continuité

Ville-noyau	Pop. commune	Pop. agglo. urbaine	Pop. aire urbaine
Paris	2 193 031	10 197 678	11 836 970
Montpellier	253 712	320 760	514 473
Nîmes	143 468	161 101	244 731

TAB. 1 – Les populations de Paris, Nîmes et Montpellier en 2007 selon chacune des délimitations spatiales présentées (les chiffres sont issus du dernier recensement INSEE (2007)).

morphologique de l'existant, ne sont pas autonomes, mais liés à la proximité d'une ville-centre, polarisante, et qui se traduisent notamment par des navettes domicile-travail. La continuité du bâti n'est alors plus un critère suffisant.

L'aire urbaine. Une définition fonctionnelle doit permettre de mieux appréhender spatialement la ville dans son fonctionnement, sa dynamique humaine. Une des idées envisageables est de prendre en compte les *migrations* entre la ville et ses périphéries, donc les mobilités des populations périphériques. C'est d'ailleurs le critère des navettes domicile-travail qui a été retenu par l'INSEE pour définir le périmètre des zonages en *aires urbaines* (ZAU).

Les Etats-Unis furent probablement le premier pays à mettre en œuvre les aires fonctionnelles, avec les SMSA (Standard Metropolitan Statistical Areas) [PPK06, BGM08]. En France il a fallu attendre 1996 pour voir entérinée une définition officielle et statistique des aires fonctionnelles, même s'il y avait déjà eu une tentative préalable avec les zones de peuplement industriel ou urbain (ZPIU), définies par l'INSEE en 1962 et qui essayèrent aussi d'élargir la définition de la ville par rapport à celle des agglomérations. En effet, pour les villes autre que Paris, les seuils statistiques établissant la définition morphologique de l'agglomération urbaine intégraient mal la banlieue de la plupart des grandes villes françaises (exception faite de Paris, pour laquelle la différence de taille entre agglomération et aire urbaine est moins significative que pour d'autres villes françaises).

A titre d'exemple, le tableau 1 donne les populations de Paris, Nîmes et Montpellier⁷ selon chacune de ces définitions (les chiffres sont issus du dernier recensement INSEE (2007)).

Ces différentes définitions sont formelles : elles proposent une délimitation spatiale sur la base d'une combinaison de critères morphologiques et statistiques normés. Ces délimitations elles-mêmes dessinent des modèles de villes. Elles ont été à la fois le résultat de travaux initiés par des laboratoires de recherches, et par des commandes politiques désireuses de mieux maîtriser leurs politiques d'aménagement, notamment de transports. Elles ont une vocation opérationnelle : pour pouvoir intervenir légalement il faut une référence, et c'est sur la base de ces délimitations que sont ventilés les investissements, qu'est choisie la législation à appliquer, etc.

Cependant les seuillages statistiques sont discutables, et les critères démographiques, morphologiques et fonctionnels ne sont sans doute pas les seuls pertinents pour définir une ville. Mais, au contraire des entités « atomiques » également objets de la discipline (l'individu, le bâti, etc.), immédiatement identifiables et dont la délimitation fait universellement consensus, les villes, même ainsi définies, sont des entités « composites ». Nous verrons les questions que cela soulève lorsque l'on souhaite les prendre comme entités dans une modélisation comparative.

⁷ parce que nous évoquons ces deux dernières dans la section 2.2.2)

2.2.2 La ville, « un système à l'intérieur d'un système de villes » (Brian Berry, 1964)

L'idée qui s'exprime dans cette célèbre formule de Berry est qu'on ne peut comprendre l'évolution d'une ville sur le long terme si on la considère isolément de l'ensemble des villes avec lesquelles elle interagit, formant un *système des villes*. Les acteurs locaux jouent bien sûr un rôle dans la trajectoire prise par une ville, mais leurs actions sont contraintes par un enchaînement historique (une *path dependency* [BAEK87]), i.e par le poids de l'histoire passée de la ville et de sa situation relative par rapport aux autres villes.

Nîmes et Montpellier. Le géographe et urbaniste Raymond Dugrand avait mis en balance ces poids relatifs de la dynamique passée et les « commandes » impulsées par la gouvernance d'une ville, en comparant les trajectoires de deux villes voisines du sud de la France, Nîmes et Montpellier. Les trajectoires croisées de Montpellier, sujette à une croissance exceptionnelle depuis les années 1960, et celle de Nîmes, ayant perdu sa suprématie régionale au profit de son voisin depuis lors, ne sont pas explicables par les seules différences de politiques des équipes municipales qui se sont succédées. Nîmes et Montpellier avaient la même taille de population au début des années 1950. Toutes les deux ont bénéficié de l'arrivée, lors de la décennie suivante, des rapatriés d'Afrique du Nord, qui se sont beaucoup concentrés dans le Languedoc. Mais à cette époque-là Montpellier a décollé et transformé sa structure d'activités beaucoup plus vite que Nîmes.

Pour comprendre cette différenciation, il faut voir que Nîmes était une ville ouvrière, tandis que le profil de composition sociale de Montpellier, qui s'observe dans d'autres villes (par exemple à Rennes et Metz), est (et était) déjà un profil aussi peu ouvrier que l'agglomération parisienne, sans pour autant avoir les fonctions propres aux très grandes villes⁸. En revanche, les catégories comme celles des petits commerçants, des patrons de l'industrie et du commerce, de l'administration, y étaient sur-représentées par rapport à la moyenne des villes françaises. Legrand rappelle que Montpellier était une ville de propriétaires terriens, des rentiers du sol qui selon lui n'avaient pas fait l'effort d'investir dans l'industrie au moment de la révolution industrielle (ce qu'il montre dans sa thèse, en fustigeant cette incapacité à adopter l'innovation).

Nîmes avait un passé prestigieux dans l'Antiquité, mais s'est moins développée à l'âge classique que Montpellier. Elle n'avait par exemple pas d'université, alors que Montpellier était déjà aux XVI^e et XVII^e siècles le siège d'une université de médecine de renommée internationale. La présence de services comme l'université a favorisé le redémarrage de la ville autour des nouvelles activités à fort contenu informationnel, et la formation d'un capital travail de haute qualification dans les années 1960-70, avec l'implantation d'IBM et d'autres instituts de recherches. A l'inverse Nîmes, orientée sur la production textile⁹, avait conservé dans sa composition une forte propension d'ouvriers, ce qui a pu contribuer à dissuader les investisseurs au cours des trente glorieuses. Les entreprises qui se développaient alors étaient un peu plus « libres » par rapport aux ressources naturelles, ne recherchaient pas les savoir-faires ouvriers, et tentaient d'éviter les villes avec une forte tradition ouvrière (influence des syndicats). Enfin Nîmes offrait des conditions de vie moins attractives pour les cadres que son voisin montpellierain (ressources éducatives pour les enfants, etc.).

A travers cet exemple célèbre, Dugrand montre que les déterminants ayant abouti à l'installation d'entreprises innovantes dans l'agglomération de Montpellier, et au développement

⁸Ce ne sont pas des villes de même niveau, Montpellier se plaçait dans la classe des villes de 100 000, 200 000 habitants, alors que dans les années 1960 l'agglomération parisienne comptait déjà 7 à 8 millions d'habitants

⁹Le célèbre *denim* qui renvoie aux toiles utilisées pour la confection des jeans (!) et produites par une célèbre famille nimoise <http://fr.wikipedia.org/wiki/Denim>

économique qu'elles ont occasionné, sont divers et que c'est une histoire un peu plus longue que la durée sur laquelle est active une équipe municipale.

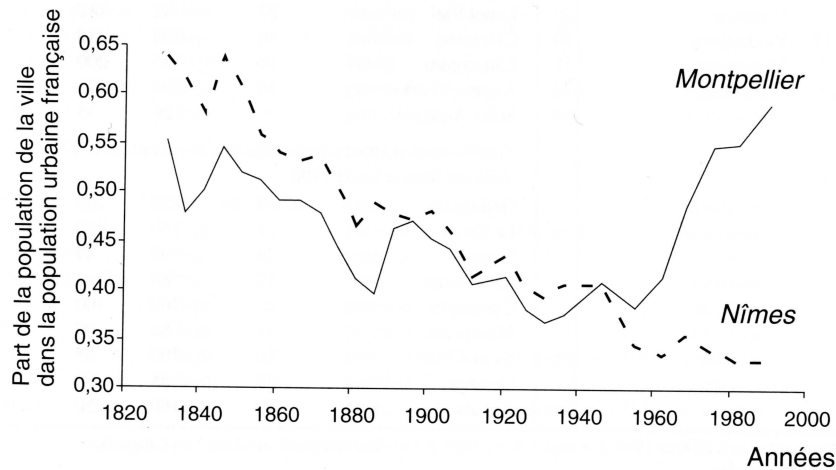


FIG. 2.4 – Evolution des villes de Nîmes et Montpellier au sein de la hiérarchie des villes françaises (extrait de [Arc98]).

Les systèmes de villes. Cette comparaison est classique car elle met bien en évidence le poids des dynamiques passées, les générations de villes, les spécialisations associées aux cycles d'innovation successifs qui laissent des traces dans le paysage. Ces traces sont longues à se résorber. Elles constituent ce que les économistes appellent l'avantage comparatif, et qui est central dans l'étude des villes en géographie. Ce sont ces dynamiques à pas de temps longs, ceux des cycles d'innovation pour la captation desquels les villes sont en concurrence, et qui orientent leur devenir sur le long-terme. La comparaison entre Nîmes et Montpellier révèle l'importance d'un autre niveau d'organisation spatiale du territoire, celui du réseau des villes, ou *système des villes* :

« Les villes d'un même territoire, grande région ou Etat, ne se développent pas isolément. À la différence des villages, ou des exploitations minières qui produisent surtout à partir des ressources locales, d'un site, les villes valorisent des avantages de situation : par leurs réseaux de pouvoir, de production, de commerce... elles accumulent des profits prélevés sur des ressources parfois très éloignées. Toujours mises en relation les unes avec les autres par de multiples réseaux de communication et d'échange, les villes constituent des systèmes fortement interdépendants. On ne peut comprendre le fonctionnement et l'évolution d'une ville sans la comparer aux autres, *comme un élément dans un système de villes*. Selon la taille des villes, ce système de référence est un territoire plus ou moins vaste, le plus souvent régional ou national, mais parfois continental voire mondial, dans le cas des métropoles. » [PPK06]

C'est dans une optique de comparaison des trajectoires de villes et de compréhension de leur fonctionnement en système que prennent tout leur sens les définitions de la ville vues dans la section précédente.

3 Simulation urbaine dynamique et sans agents

La religion d'une époque constitue le divertissement littéraire de la suivante. (*R.W. Emerson*)

Il est maintenant temps de nous focaliser sur les modèles dynamiques de ville, qui correspondent au troisième mouvement que nous avons évoqué (cf. section 1.4). Au début des années 1990 des jeux vidéo sur PC comme *SIMCITY*¹⁰ et *CIVILIZATION*¹¹ ont grandement contribué à populariser l'idée qu'on pouvait *simuler des villes*. Cette idée a pourtant pris son essor dès le début des années 1950, de concert avec la révolution spatiale quantitative. Formaliser les territoires et leurs sociétés comme des *systèmes dynamiques*, filtrer et simplifier leur description pour offrir une lecture *mécanique* des processus géographiques, et utiliser des ordinateurs pour les *calculer*, ces idées se développent depuis plus de soixante ans.

Dans cette section 3, nous présentons sept modèles importants, dont la réalisation s'est étalée entre 1952 et 1993. Leur ordre de présentation suit le degré de désagrégation de la représentation de l'espace qu'ils proposent. Le premier modèle est dynamique mais sans espace, le dernier est un automate cellulaire de quelques milliers de cellules qui couvrent l'espace d'une ville entière. Nous nous arrêtons juste avant les premières applications s'inscrivant dans le courant de la simulation multi-agents. Une sélection de ces modèles à base d'agents est présentée dans la section suivante. Notre passage en revue est rapide, il a pour but de donner « le goût » de l'histoire et de la variété des approches de simulation urbaine, avant de nous concentrer sur les modèles à base d'agents.

3.1 Grille d'analyse et de classification des modèles dynamiques présentés

Nous allons présenter des modèles qui représentent une ville comme un *système dynamique*. La notion de *système dynamique* (SD) permet de formaliser la notion de processus de développement. Un système dynamique est caractérisé par des observations qui évoluent dans le temps. Ces observations sont les variables du système et sont reliées par certaines relations. Ces variables rendent compte des propriétés pertinentes du système (qu'elles soient géographiques, physiques, chimiques, biologiques, sociologiques, ...). A un instant donné, elles prennent une valeur et l'ensemble de ces valeurs constitue l'état du système. L'ensemble de tous les états possibles d'un système constitue son espace d'états (ou espace des configurations).

Par exemple, une pierre qui tombe est un système caractérisé par les variables position et vitesse de la pierre. Ces deux variables ne sont pas indépendantes : si on conçoit la position de la pierre comme une fonction du temps, la vitesse est la dérivée de cette fonction.

La séquence temporelle des états du système est appelée une trajectoire. Un SD est un moyen formel pour spécifier comment on passe d'un point dans l'espace des configurations (un état) à un autre (l'état suivant). Ceci peut se faire directement par une fonction (la fonction d'évolution du système) ou indirectement en donnant des contraintes (équations) sur l'état futur possible (qui n'est pas nécessairement unique si le système n'est pas déterministe). Divers formalismes mathématiques correspondent à cette notion très générale de système dynamique. Par exemple les variables peuvent prendre des valeurs continues ou discrètes. De la même manière, l'avancement du temps peut progresser par pas de temps discrets ou bien se faire continuellement.

Dans les cas simples, la trajectoire d'un système dynamique peut s'exprimer explicitement par une fonction analytique du temps t . Par exemple, dans le cas de la pierre qui tombe, les équations différentielles $dx/dt = v$ et $dv/dt = g$ peuvent s'intégrer explicitement pour donner la distance parcourue par la pierre en fonction du temps : $x(t) = gt^2$.

¹⁰ première sortie chez Maxis en 1989

¹¹ première sortie chez Microprose en 1991

Dans les cas un peu plus complexes, une formule analytique donnant la trajectoire n'existe pas et la simulation par ordinateur est alors une approche privilégiée pour étudier les trajectoires du système. Par ailleurs, on peut s'intéresser non pas à une trajectoire particulière mais aux propriétés qualitatives vérifiées par toutes les trajectoires possibles, comme par exemple : « si on attend assez longtemps, le système finira par prendre un état bien déterminé qu'il ne quittera plus » ou encore « si on passe par ces états, on n'y repassera jamais ». On parle de propriétés *émergentes* quand il n'existe aucun moyen plus rapide pour les prédire que de les observer ou de les simuler. Notons que des SD dont la spécification est très simple peuvent donner des trajectoires extrêmement complexes (on parle parfois de comportement chaotique) ; d'autre part, le calcul de la trajectoire du système peut être coûteux en temps d'ordinateur et exiger beaucoup de mémoire.

Pour chacun des modèles présentés dans la suite, nous mentionnons la question posée, l'approche de calcul mise en œuvre, la représentation de l'espace, du temps et de l'état, les propriétés des processus modélisés (linéaires ou non linéaires ? simples ou compliqués ?), les terrains d'application et les résultats obtenus, et enfin la « valeur ajoutée » du modèle par rapport aux précédents ainsi que ses limites.

Nous concluons cette section par un tableau récapitulatif indiquant la nature discrète ou continue du traitement de l'espace, du temps et de l'état du système pour chacun des modèles.

3.2 Jay Forrester et les *stocks and flows*

En 1969 l'ingénieur J. Forrester, après avoir modélisé les dynamiques de l'évolution industrielle [FW61], et avant de s'attaquer à celles du monde [F⁺71], décide de s'intéresser aux villes, et en particulier à celle de Boston [For69]. Forrester compte parmi les initiateurs du *global modeling movement*, un collectif de modélisation qui s'est attaqué à des problématiques démographiques et économiques à l'échelle du monde.

Forrester s'intéressait aux causes du déclin des centres anciens des villes américaines, et aux politiques publiques qui permettraient d'y remédier. Il chercha donc à concevoir un modèle qui permette de simuler des scénarios concurrents de politiques d'investissement, et évaluer leurs conséquences en termes de (re-)développement d'une zone urbaine sur le long terme. Son objectif était clairement opérationnel.

Pour répondre à ces questions, Forrester retient trois sous-systèmes, trois grands « acteurs » urbains : les employés, les logements et les entreprises. Il discrétise chacun de ces trois acteurs en trois catégories : les employés en cadres professions libérales, travailleurs et sous-employés ; les logements en grand standing, ouvriers et très bas standing ; et enfin les entreprises en nouvelles, anciennes et en récession. Il décrit la dynamique urbaine en termes de *stocks* et de *flows* (flux). Un stock représente l'accumulation passée de flux entrés et sortis. Chacune des neuf catégories mentionnées précédemment est ainsi représentée par une variable de type *stock*, qui représente l'effectif de cette catégorie à un instant donné.

Le modèle n'est pas spatial, le temps est représenté de façon continue, et l'état du système à un instant donné est décrit par un vecteur de neuf variables entières. L'évolution des stocks est dictée par des équations différentielles couplées qui combinent plusieurs variables de flux, et qui représentent les entrées-sorties des effectifs dans le système ainsi que les transferts d'effectifs d'un stock à un autre.

Forrester exposa son modèle à l'aide de représentations graphiques inspirées des schémas de montage de systèmes hydrauliques. Cela renforçait l'idée d'une perception *mécaniste* de la

dynamique d'une ville, ce qui faisait largement débat en géographie à cette époque ([PPK06], entrée *Modèle*). La spécification complète du modèle est très volumineuse : en plus des neuf variables d'état, celui-ci intègre environ 300 variables secondaires et paramètres. Cela rend très difficile l'étude des propriétés du modèle et amène à l'étudier par la simulation. Les simulations reproduisent l'évolution de la ville pendant une période de 250 ans. Même s'il n'utilise la machine que pour itérer un calcul qui résiste à l'analyse, Forrester fut avec Lowry un des premiers à instaurer l'idée qu'un simulateur informatique pouvait constituer un outil de recherche urbaine.

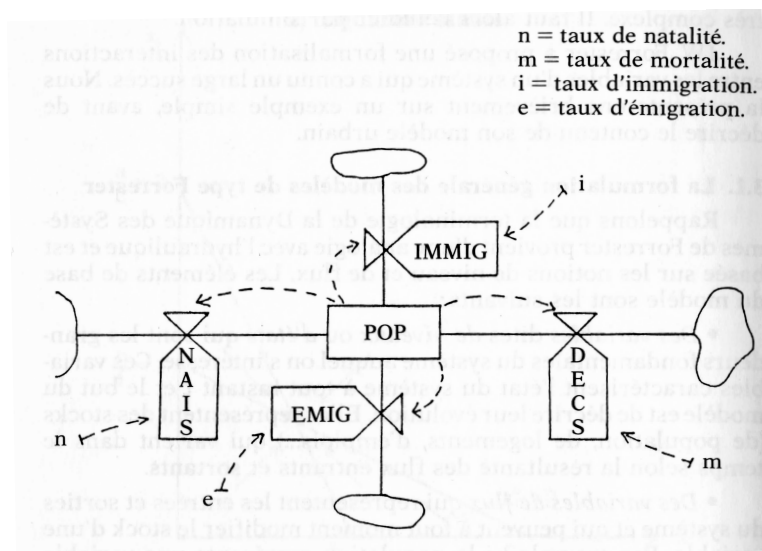


FIG. 2.5 – Représentation des flux d'un système simple de Forrester (extrait de [PSJS89], page 58)

En calculant divers scénarios de rénovation urbaine prônés à l'époque (construction massive de logements sociaux pour les ménages à faibles revenus notamment), Forrester arriva à des courbes d'évolutions des effectifs plutôt pessimistes : elles montraient que ces politiques d'investissement étaient, au sens de son modèle, vouées à l'échec et ne feraient qu'accentuer le déclin économique de la ville. Après une période de croissance d'une centaine d'années la ville subissait un déclin sévère pendant 40 ans, avant de croître à nouveau et de tendre vers un état d'équilibre (les différents stocks n'évoluent plus). Plusieurs études du modèle, réalisées après la publication de l'ouvrage par d'autres chercheurs montrèrent que le modèle n'était pas robuste : il est possible, en jouant sur les valeurs de ses très nombreux paramètres, de produire des régimes dynamiques structurellement différents de la convergence vers un point fixe calculée par Forrester.

Selon [PSJS89], ce modèle avait l'énorme intérêt d'être « un excellent moyen de formulation schématique », et « de permettre de représenter et de structurer l'information que l'on a sur un système ». Il permettait aussi bien sûr de mettre l'accent sur les effets contre-intuitifs engendrés par les phénomènes de rétroaction.

Dans le contexte historique de la modélisation urbaine, le modèle de Forrester était donc révolutionnaire à plus d'un titre. Il s'agissait d'un modèle dynamique, et ce fut le premier à avoir eu un tel écho. Ensuite, avec son système d'équations aux différences couplées, Forrester formalise explicitement l'idée que des boucles de rétroactions (*feedback*) impulsent les dynamiques intra-urbaines.

Mais le modèle de Forrester est également remarquable dans la vague de critiques négatives qu'il suscita parmi ses contemporains. Il fut notamment reproché à l'auteur sa méconnaissance

des fondamentaux de théorie géographique. Par exemple, le modèle n'a pas de dimension spatiale, la ville n'y est représentée que fonctionnellement. De plus il est fermé causalement (bien qu'il intègre des flux entrants et sortants qui représentent la communication avec l'environnement). C'est donc la structure interne de la ville modélisée qui commande sa dynamique. Au vu de ce que nous avons dit précédemment sur le rôle déterminant du contexte d'une ville sur sa trajectoire au sein du système, nous comprenons facilement qu'il lui a bien sûr été reproché d'isoler la ville du système des villes. Enfin d'après [BT04], l'assurance de Forrester dans le caractère quasi-prophétique de ses calculs fut préjudiciable au développement des modèles dynamiques lors des années qui suivirent. De plus, Forrester ayant été largement conseillé par les responsables municipaux, on suspecta son modèle de servir de faire-valoir aux politiques libérales, lesquelles allaient à l'encontre des programmes volontaristes de rénovation urbaine des années 1960. . .

La réaction des modélisateurs à ces critiques fut le développement de modèles proposant une vision enrichie de la ville, regardée non plus comme un système fermé mais comme un système ouvert, auto-organisé, et pouvant évoluer entre des régimes qualitativement différents.

3.3 Des villes ouvertes et auto-organisées : les modèles de l'école de Bruxelles et de l'école de Leeds

A la fin des années 1970 se développèrent au même moment, à Bruxelles et à Leeds, deux modèles qui franchirent un palier dans la représentation de la ville qu'ils calculaient. Ces modèles furent :

1. celui de l'équipe de Peter Allen à Bruxelles ;
2. celui de l'équipe d'Alan Wilson à Leeds.

Ces deux modèles sont souvent présentés comme les premiers modèles à être à la fois dynamiques et spatiaux¹². Le modèle de Lowry [Low64], évoqué en section 1.3, était spatial mais seulement pseudo-dynamique, tandis que celui de Forrester était dynamique mais non spatial.

Ces deux modèles se réclamaient de deux « écoles systémiques » distinctes. Le modèle d'Allen venait de la physique et était conçu en référence directe aux travaux d'Ilya Prigogine sur les structures dissipatives. Il reprit à ce dernier les équations décrivant les processus menant à des structures auto-organisées loin de l'équilibre. Le modèle de Wilson était quant à lui plutôt une dynamisation de modèles classiques d'interactions spatiales, du type de celui de Lowry. Mais en plus d'introduire une dynamique, Wilson mobilisa les outils mathématiques développés par René Thom avec sa théorie des catastrophes pour étudier analytiquement les points d'équilibre de son modèle.

Les deux sont intra-urbains (ils s'intéressent à l'évolution de l'« intérieur » d'une ville), génériques (ils cherchent à représenter n'importe quelle ville), et enfin présentent beaucoup de similitudes dans les objets et processus qu'ils intègrent. Ils ne prétendent pas renouveler la théorie urbaine, mais intègrent au contraire les processus qui font consensus et qui ont le mieux résisté à la confrontation aux données [PSJS89]. Dans les deux, le temps modélisé est continu, la structure spatiale de la ville est statique et discrète : c'est un ensemble fini de « zones »¹³ localisées dans l'espace, qui ne sont pas nécessairement ni homogènes ni isotropes. Ces deux modèles n'intègrent pas de processus de développement morphologique (géométrique) de la ville. Les fonctions d'évolution de ces différentes variables sont données sous la forme d'équations différentielles non linéaires, et sont trop compliquées pour être intégrées analytiquement. Il n'existe pas de

¹²Nous verrons dans la section suivante qu'en fait, ils furent tous les deux précédés chronologiquement par le modèle d'Hägerstrand, mais ce dernier est plus désagréé, et donc présenté après

¹³*regions* en anglais

forme close donnant la trajectoire de la ville en fonction du temps, et la trajectoire doit donc être simulée (itérée).

Des interactions spatiales fondamentales sont intégrées dans les deux cas [PSJS89] :

- l'induction entre les effectifs des différents types d'activités, telle qu'elle est décrite par la théorie de la base économique ;
- des stratégies de localisation différenciées selon les types d'activités ;
- l'effet dissuasif de la distance ;
- la compétition pour l'espace et l'inertie des localisations ;
- la dynamique ségrégative des populations.

Dans le modèle d'Allen, l'état de chaque zone est un vecteur de variables, qui inclut :

- les quantités d'emplois des quatre types d'activités pris en compte ;
- les quantités de population résidente (répartie en « cols blancs » et « cols bleus ») ;
- les variables encodant la localisation dans l'espace ;
- l'accessibilité aux réseaux.

Ces deux modèles montrèrent qu'il était possible de reconstruire formellement un modèle de ville distribué, s'auto-organisant dynamiquement, et pouvant exhiber des régimes structurellement différents suivant les valeurs données à ses paramètres [PSJS89]. Ils allaient donc plus loin que le modèle de Forrester.

Allen et Wilson ont chacun appliqué leurs modèles à leurs villes respectives, Bruxelles et Leeds. Rabino et ses collègues ont également appliqué le modèle de Wilson à Rome et Turin. A notre connaissance, l'application la plus poussée a été faite par les géographes Pumain, Saint-Julien et Sanders pour le modèle d'Allen. Elles ont comparé les trajectoires de quatre villes françaises (Rouen, Nantes, Strasbourg et Bordeaux) sur la période 1954-1975¹⁴.

Ces deux modèles sont représentatifs d'un courant de modélisation urbaine dynamique dénommé *integrative regional modeling* dans la littérature anglophone, pour la double raison que (a) la ville est représentée comme un ensemble de *régions*, chacune décrite par des variables d'effectifs (en emplois, logements, ménages, individus, etc.), et (b) qu'ils intègrent les processus d'interaction et de localisation qui tendent à modéliser la ville dans son intégralité. Parmi toutes les interactions existant en milieu urbain au niveau microscopique (individus/ménages, entreprises), ils retiennent seulement celles qui sont susceptibles d'engendrer au niveau macroscopique une différenciation des *régions*. Le choix de variables et de processus reflète leur problématique, qui est l'étude dynamique de la différenciation de la structure spatiale intra-urbaine. En ce sens, ils sont à rapprocher des problématiques de l'économie spatiale, dont l'objectif est justement d'apporter une réponse à la question « qui (ou quoi) se localise où ? », « qui » (ou « quoi ») se référant aux agents (ou équipements) économiques, tels qu'entreprises et ménages (ou les infrastructures publiques), « où » se référant à des zones géographiques variées allant de la ville au marché regroupant plusieurs pays, en passant par les collectivités territoriales et les régions » [FT97].

Modèles « boîtes noires ». Nous faisons une incartade à notre progression « désagrégative » pour indiquer qu'à la même époque, prenant un parti inverse de ce courant « intégratif », ont été développés des modèles très agrégés parfois étiquetés « boîtes noires ». Ils sont influencés

¹⁴Le chapitre 3 de [PSJS89] présente cette expérimentation et ses résultats sur près de 80 pages, et inclut une description détaillée de leur méthodologie, de l'harmonisation et du choix des données.

par les équations couplées non-linéaires de l'écologie des populations (modèle de Lotka et Volterra), puis de la popularisation des découvertes sur le comportement chaotique de systèmes déterministes simples (l'équation logistique discrète de May (1976) et les modèles de Lorenz en météorologie). Les modèles sont beaucoup plus « petits » : ils contiennent très peu de variables et les processus représentés restent aussi simples que possible à écrire, de façon à pouvoir être analysés mathématiquement. Pour autant ils peuvent donner naissance à des comportements dynamiques variés, et qui ressemblent à des phénomènes spatiaux réellement observés. Ces modèles plus agrégés s'inscrivent plutôt dans une approche heuristique et explicative de grands principes qu'opérationnelle et prédictive. A l'inverse les modèles d'Allen et Wilson recherchaient une plus grande vraisemblance géographique dans la description. [San84, PSJS89, BT04] proposent des descriptions de modèles réutilisant les équations différentielles couplées de modèles proie-prédateurs de Lotka et Volterra pour exprimer des dynamiques de compétition spatiale entre catégories sociales, ou encore de concurrence entre firmes pour l'acquisition d'aires de marché.

3.4 Hägerstrand, la diffusion spatiale des innovations et les débuts de la microsimulation

Au tout début des années 1950 en Suède, presque vingt ans avant Forrester et trente ans avant Allen et Wilson, Torsten Hägerstrand avait posé les bases de ce qui allait devenir un courant important de modélisation en sciences sociales : la simulation micro-analytique ou *microsimulation*.

L'idée directrice d'Hägerstrand était que pour reproduire et comprendre l'évolution d'un phénomène social à un niveau macro (jusqu'à un pays entier), il fallait nécessairement poser le problème au niveau de ses composantes « atomiques », donc au niveau des individus. Avec une telle approche, un modèle consiste alors à dérouler des biographies individuelles en parallèle, et à effectuer des mesures collectives sur l'ensemble de la population simulée : du comptage (par exemple pour mesurer la taille de la population), de la classification (pour mesurer l'évolution des structures familiales, économiques, etc.). C'est donc l'idée d'individualisme méthodologique appliquée à la modélisation dynamique, qu'Orcutt développa sur des questions économiques (CORSIM, [Orc57]). Ce courant fut par la suite relayé et amplifié grâce aux développements matériels et logiciels (langages de plus haut niveau) et des approches de calcul pour concevoir des modèles entité-centrés (parmi lesquelles les systèmes multi-agents).

Hägerstrand s'intéressait à la diffusion spatiale d'innovations dans une population humaine, en l'occurrence la rotation des cultures. Dans son modèle, il suppose que cette diffusion se fait de deux façons complémentaires : une diffusion privée, d'individu à individu, et une diffusion publique, de la société à l'individu.

L'espace est discrétisé en une grille 9×9 de cellules identiques, chacune peuplée par 30 individus. Chacun d'entre eux est représenté par une variable d'état dont la valeur correspond à son niveau de connaissance de l'innovation. Le temps est également discrétisé et la transmission de l'innovation se fait de façon atomique. Les processus représentés sont essentiellement des interactions « horizontales », d'individu à individu.

Selon la présentation qui en est faite dans [BT04], trois versions principales du modèle sont mises au point. Dans une version de base, l'acquisition de l'innovation par un individu se fait de façon aléatoire, dans l'espace et dans le temps. Ce processus aléatoire et les configurations qu'il engendre servent de point de comparaison aux versions améliorées du modèle. Dans une seconde version sont intégrées des interactions stochastiques d'individu à individu. Seuls ceux qui maîtrisent déjà l'innovation peuvent la transmettre aux autres individus, qui peuvent l'accepter ou la refuser. Dès qu'un individu a reçu l'innovation, il peut à son tour et sans délai la diffuser aux autres. Ces processus génèrent des trajectoires plus conformes aux données. Mais les meilleurs

résultats sont obtenus pour une troisième version qui intègre un raffinement supplémentaire : un individu ne peut acquérir et transmettre à son tour une innovation qu'après un certain délai, en fait qu'après avoir été exposé un certain nombre de fois à l'innovation.

En 1952 Hägerstrand ne pouvait pas avoir facilement accès à une plate-forme de calcul suffisamment puissante pour automatiser l'exécution de son modèle. Dans [San06], L. Sanders rappelle qu'il déroula dans un premier temps ses simulations « à la main », avec une paire de dés comme générateur de nombres aléatoires. Son travail était véritablement pionnier pour l'époque, et on peut regretter qu'il ne bénéficia pas alors de matériels et logiciels adaptés. D'après [BT04], ce modèle d'Hägerstrand resta d'abord assez confidentiel, avant de paraître au grand jour à la fin des années 1960, suite à la traduction anglaise de son livre publié quinze ans plus tôt en Suède.

Parmi les « disciples » d'Hägerstrand, R. Morrill proposa un modèle de diffusion spatiale d'un ghetto dans la ville de Seattle (1963-65) ainsi que des modèles de migrations en Suède, tous individus-centrés et utilisant la méthode de Monte-Carlo utilisée par Hägerstrand.

3.5 Modèles *raster* des années 1960

Au début des années 1960, alors que les explorations individus-centrées d'Hägerstrand n'étaient pas encore aussi diffusées qu'elles l'ont été depuis, les américains Donnelly, Chapin et Weiss mettent au point un modèle novateur en termes de désagrégation spatiale, pour étudier le développement résidentiel à l'échelle d'une ville entière [DCW64, Cha65, CW68].

Ce modèle propose une discrétisation uniforme de l'espace intra-urbain en une grille de cellules de 300m×300m (9ha.). Comme ces dimensions sont trop grandes pour leur associer de façon vraisemblable une utilisation du sol uniforme, chacune est re-découpée en une grille 3×3 de neuf petites cellules. Chacune de ces petites cellules représente une surface d'un hectare. Son état est décrit par :

- une variable booléenne indiquant si la cellule est développée ou non (*i.e* si elle contient ou non des résidences) ;
- un indicateur d'accessibilité aux réseaux de transports ;
- un prix.

L'état d'une grande cellule correspond à une valeur entière dans l'intervalle $[0 \dots 9]$, qui correspond au nombre de petites cellules développées.

Le modèle représente l'étalement résidentiel comme un processus à la fois :

- non-réversible : les cellules vierges de toute occupation peuvent devenir résidentielles, mais l'inverse n'est pas possible ;
- dépendant de caractéristiques à la fois locales (un potentiel est calculé au niveau de chaque cellule) et globales (le volume de nouvelles résidences à localiser dans l'espace est calculé globalement).

Une itération du modèle consiste en 2 étapes successives :

1. Le potentiel de chaque grande cellule est calculé comme une fonction linéaire de sept facteurs distincts, dont trois sont endogènes (dépendent de l'état de la cellule) et quatre exogènes [BT04]. Ces potentiels sont ensuite normalisés pour être traduits en probabilités pour chaque cellule d'accueillir de nouveaux bâtiments ;
2. L'effectif total de nouvelles résidences construites est déterminé. Il correspond à ce qui est nécessaire pour satisfaire une demande calculée indépendamment de l'état des cellules, et globalement pour l'ensemble de la ville. Cet effectif est alors distribué proportionnellement aux potentiels des cellules.

[BT04]¹⁵ présente ce modèle ainsi que d'autres représentants de ce courant de modèles « presque-AC ». Ces modèles de villes, qualifiés en anglais de *raster* ont été développés à la même époque (pendant les années 1960 aux E.-U.) et partagent les propriétés suivantes :

- l'espace est représenté par un tableau 2D de cellules, dont la structure reste fixe au cours du temps ;
- toutes les cellules sont identiques, régulières, et décrites par les mêmes variables ;
- ils sont espace-centrés : les processus intégrés décrivent le changement d'état d'unités spatiales ;
- ils intègrent deux niveaux de décision, en distinguant le potentiel des cellules d'une part (qui dépend de propriétés purement locales), et le processus de localisation (qui dépend d'un contexte global)

Bien qu'ils possèdent à la fois les propriétés entité-centrés et espace-centrés, ces modèles ne sont pas aussi locaux et distribués qu'un AC. En effet la règle de changement d'état d'une unité spatiale ne peut pas être définie localement à celle-ci, pour deux raisons :

1. elle dépend de contraintes globales au niveau de la ville, dont certaines sont indépendantes de l'état des entités ;
2. elle dépend de l'état de l'ensemble des entités (puisque l'affectation des nouveaux effectifs s'effectue après avoir considéré les potentiels de toutes les entités).

De plus, la formule linéaire calculant le potentiel de chaque cellule *ne tient pas compte de l'état des cellules voisines*.

3.6 Automates cellulaires de Tobler à Detroit

Ce dernier pas vers le développement de modèles qu'on puisse véritablement associer à des automates cellulaires fut franchi dans les années 1970, en premier lieu par le géographe suisse-américain Waldo Tobler, lui aussi avec un modèle de développement spatial du peuplement. Tobler¹⁶ cherchait à modéliser la croissance démographique dans la ville de Detroit et sa traduction spatiale.

Dans un court article publié en 1979 [Tob79], il distingue différentes classes d'automates utilisés en simulation urbaine, et positionne les *automates géographiques*. Il propose la classification suivante, où g est la fonction d'état et $g(t, i, j)$ l'état (ici le type d'utilisation du sol (commerces, résidence, agriculture, ...)) de la cellule (i, j) à l'instant t :

- un modèle *indépendant* (I) est tel que : $g(t + dt, i, j)$ est aléatoire et n'est pas fonction de $g(t, i, j)$;
- un modèle *fonctionnellement dépendant* (II) est tel que $g(t + dt, i, j) = F(g(t, i, j))$;
- un modèle *historique* (III) est tel que : $g(t + dt, i, j) = F(g(t, i, j), g(t - dt, i, j), g(t - 2dt, i, j), \dots, g(t - kdt, i, j))$;
- un modèle *multivarié* (IV) est tel que $g(t + dt, i, j) = F(u(t, i, j), v(t, i, j), w(t, i, j), \dots, z(t, i, j))$;
- enfin, un modèle *géographique* (V) est un modèle où l'état suivant d'une unité spatiale dépend de l'état des unités voisines : $g(t + dt, i, j) = F(g(t, i \forall p, j \forall q))$

La figure 2.6, issue du même article, illustre ces différences :

¹⁵Chapitre 4, pages 107 à 113

¹⁶à qui l'on doit également des travaux fondateurs sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG))

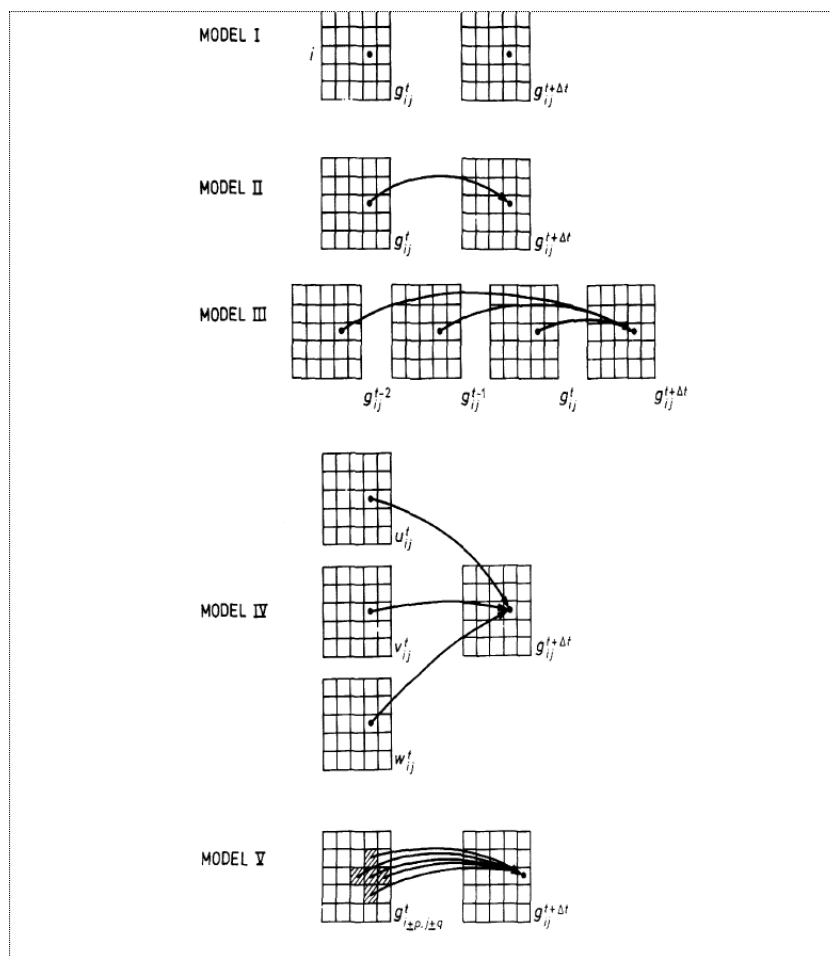


FIG. 2.6 – Les différentes classes d'automates selon Tobler [Tob70]

Pour Tobler l'automate géographique est bien celui dont la fonction de transition tient compte de l'état des cellules voisines. Dans sa classification, on voit que le type de voisinage considéré par Tobler est un *voisinage de Von Neumann*.

La prise en compte du voisinage uniquement, et non plus d'un champ moyen calculé sur l'ensemble des cellules, permet aux modèles de Tobler de s'accorder avec sa phrase célèbre « Everything is related to everything else, but near things are more related than far things » [Tob70].

Avec le recul du temps écoulé, cela peut nous paraître surprenant que cette dépendance au voisinage n'ait été intégrée que presque vingt ans après les premiers *rasters*. Une première interprétation consisterait à penser que l'idée n'avait simplement pas encore fait son chemin. Cette lecture est un peu naïve, et il est beaucoup plus vraisemblable que les modélisateurs « se retenaient » de concevoir des modèles trop riches en interactions entre les entités, étant donnés les moyens limités dont ils disposaient pour les calculer. Les anecdotes sur les aspects héroïques des premiers temps de l'utilisation des calculateurs en géographie nous font aujourd'hui sourire car en 2010 chaque géographe dispose d'une machine personnelle plus rapide que les grands calculateurs des années 60 et 70. Dans « Mémoires de Géographes » [GB⁺00], Tobler se souvient que le département de géographie de Santa Barbara dont il faisait partie n'avait accès à la salle de calcul qu'à partir de deux heures du matin. D. Pumain rappelle dans [All07] que les premiers calculs matriciels qu'elle eut l'occasion d'automatiser nécessitèrent plusieurs heures pour des

matrices 15×15 . Cette histoire de la rencontre de la géographie avec l'informatique est racontée dans [Jol04]¹⁷.

Chronologiquement, on peut également remarquer que l'article de Tobler parut la même année que les premiers articles d'Allen et Wilson sur leurs modèles, qui eux aussi innovaient dans le nombre d'interactions entre unités spatiales qu'ils intégraient. Il semble donc plus vraisemblable de penser qu'une bonne part de réflexion théorique sur le « comment représenter formellement une ville dans un modèle dynamique » avait précédé la possibilité effective de calculer ces modèles. Les géographes et les économistes spatiaux avaient depuis longtemps déjà mis en évidence l'influence des distances sur les interactions (modèle gravitaire) et donc cette dépendance au voisinage. Cela ne signifie pas que les modélisateurs se fassent systématiquement et intuitivement une idée nette de ce qui est calculable en un temps raisonnable de ce qui ne l'est pas. Nous avons été témoins de questionnements du type « En l'état actuel des capacités de calcul, est-ce possible de faire des modèles intégrant un million d'agents ? un milliard ? ». Nous donnerons dans la section ?? des éléments de réponse, mais avant cela il nous reste à voir comment les automates cellulaires, après les travaux pionniers de Tobler, ont été hybridés par les géographes pour les adapter à leurs questions.

3.7 Automates cellulaires contraints

Si les AC ont eu et continuent à avoir un grand succès en géographie urbaine, ils ont été utilisés dès le début au-delà de leur définition stricte, pour inclure notamment des ensembles d'états infinis, des tailles de voisinages variables d'une cellule à l'autre, ou des fonctions de changement d'état probabilistes.

Roger White et Guy Engelen furent les premiers à intégrer les avantages des approches des *rasters* [DCW64, Cha65, CW68] (section 3.5) et de [Tob70, Tob79] (section 3.6), en leur ajoutant un voisinage étendu. Comme eux ils s'intéressaient aux évolutions des utilisations du sol dans une ville sur le long-terme, mais cette fois en ne considérant plus seulement le résidentiel mais également l'industrie et les services.

Ils intégrèrent toutes ces influences au sein d'un *automate cellulaire contraint*, et formalisèrent cette séparation entre le potentiel d'une unité spatiale (déterminé localement) et son développement effectif (globalement contraint). Un AC contraint est un AC hybridé où la règle de transition ne peut plus s'exprimer de façon locale et uniforme, mais doit être décomposée en deux règles :

1. une règle locale de calcul du potentiel de chaque cellule, qui tient compte d'un voisinage ;
2. une règle globale d'affectation qui ventile des effectifs de façon probabiliste sur la base de ces potentiels.

Ces effectifs, répartis entre les cellules, représentent les différentes utilisations du sol intégrées au modèle : effectifs de résidents, d'emplois, d'entreprises, etc. Ils peuvent être *calculés par le modèle* (via des équations différentielles par exemple), ou bien correspondre à *un flux de données exogènes* injectées en entrée du modèle, dont on dispose dans des bases de données. Le but principal de ces modèles n'est donc pas de reproduire et d'expliquer la croissance des effectifs de ces différentes utilisations du sol, mais l'évolution de leur répartition spatiale au cours du temps.

¹⁷On pourrait ici beaucoup développer, car au-delà de l'axe modélisation&simulation, cette rencontre a donné naissance à la géomatique, aujourd'hui une discipline autonome. Si elle s'est structurée essentiellement autour du développement des SIG, elle intègre tous les problèmes liés à la représentation et au traitement numérique de l'information géographique, et intègre également la simulation spatiale (cf. par exemple les numéros de la Revue de Géomatique consacrés à la simulation [CL00, BP09]). T. Joliveau [Jol04] a mis en lumière les liens étroits entre les histoires des développements de la géomatique, et ceux de la simulation en géographie.

La longue période de développement abordée par ses modèles rend difficile le fait d'endogénéiser de façon réaliste la croissance des activités existantes, et l'apparition de nouvelles activités. Comme les auteurs se focalisent sur l'évolution des répartitions dans l'espace de ces activités, cela explique que les évolutions soient rendues soit par les données, soit par un calcul plus agrégé, moins réaliste mais plus maîtrisable.

Le temps est représenté de façon discrète. Dans leur cas, les données historiques sont disponibles pour des intervalles de 10 ans, mais chaque pas de temps dans le modèle correspond à une durée d'un an. Les variations d'effectifs sont distribuées de façon uniforme entre les pas de temps, et chaque itération correspond donc à la ventilation de $1/10^{\text{ème}}$ de la croissance entre deux dates consécutives dans la base.

L'espace est discrétisé en une grille régulière. Une innovation géographique du modèle est qu'il considère un voisinage d'une centaine de cellules (cf. figure 2.7). La prise en compte de l'influence de la distance entre cellules est également originale car son rôle est non-monotome : la distance entre deux activités peut avoir un effet attracteur jusqu'à une certaine distance limite, puis devenir un facteur repoussant (cf. figure 2.8).

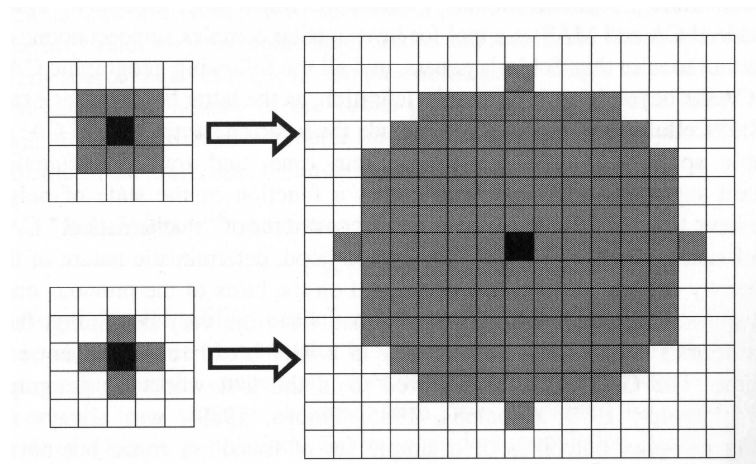


FIG. 2.7 – Voisinage géographique considéré dans [WE93]

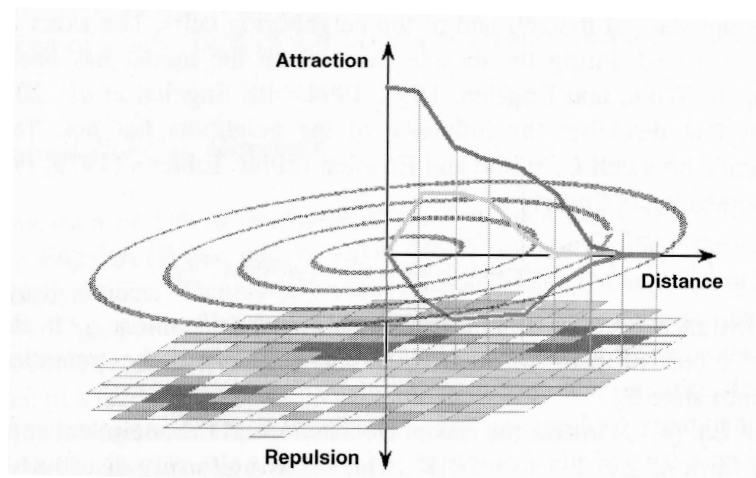


FIG. 2.8 – Evolution de l'attractivité avec la distance dans [WE93]

Comme dans les modèles précédents l'état d'une cellule à chaque instant est défini par les

effectifs des utilisations du sol éventuelles, un potentiel d'accessibilité, etc. Certaines de ses variables prennent des valeurs réelles, et l'état est donc continu.

Le modèle a été d'abord appliqué à la ville de Cincinnati sur la période 1878-1990, puis des applications ultérieures à des villes européennes (Dublin) et aux Pays-Bas, incluant des raffinements du modèle original, ont été décrites dans des articles ultérieurs (voir par exemple [WEU97] pour l'intégration d'un réseau de transports dont les données sont issues d'un SIG). L'évaluation des sorties se fait essentiellement par :

1. des comparaisons pixel-par-pixel entre les cartes simulées et cartes réelles au pas de temps final ;
2. des mesures de la dimension fractale des structures générées par le modèle.

Beaucoup de modèles se sont inspirés de ces AC constraints, qui, nous l'avons vu dans les sections précédentes, s'inscrivent eux-mêmes dans une tradition de modélisation. Nous souhaitons souligner un autre point saillant de cette approche car nous allons le retrouver souvent par la suite. La séparation du potentiel d'une cellule (estimé localement) de son développement (contraint globalement) que nous avons mis en lumière plus haut, revient à *spécifier et articuler deux niveaux d'organisation spatiale, et deux niveaux de connaissance sur le système simulé* :

1. le niveau d'organisation spatiale le plus agrégé est celui de la ville dans son intégralité. Son état est décrit par les effectifs des différentes utilisations du sol. Cet état est continu et son évolution peut être modélisée, par exemple, par un système d'équations différentielles.
2. le niveau d'organisation spatiale le plus désagrégé est celui des unités spatiales intra-urbaines, représenté comme un tableau de cellules. L'état de chacune est continu, c'est un potentiel calculé comme une fonction linéaire de plusieurs variables locales et des variables des cellules de son voisinage.

On peut considérer que ces modèles sont *multi-niveaux dans la description*. En revanche, on ne peut pas parler véritablement de *modélisation spatiale multi-niveaux*, dans la mesure où un seul niveau d'organisation a une représentation spatiale.

3.8 D'autres approches de simulation des villes

Modèles à espace continu. La mesure de la dimension fractale comme indicateur de la vraisemblance des structures urbaines simulées n'est pas en soi une innovation du modèle de [WE93], la fractalité des structures urbaines ayant été beaucoup étudiée pendant les années 1990. Plusieurs auteurs ont transposé dans un contexte urbain des modèles particuliers issus de la physique statistique pour simuler des phénomènes de peuplement, et mesurer ensuite la fractalité des agrégats produits. Batty et Longley par exemple ont transposé des modèles DLA (*Diffusion Limited Agregation*) dans un contexte urbain [BL94] pour générer des croissances de villes de formes dendritiques autour d'un noyau central (CBD), de même que Frankhauser, seul [Fra94] et avec Pumain [FP01]. Dans la même veine, Batty et l'équipe de Makse [MAB⁺98] ont poussé l'approche en utilisant des modèles de percolation corrélée, ce qui leur a permis de générer des villes polycentriques (à plusieurs centres). Ce travail a été appliqué à la simulation de l'évolution spatiale long-terme de la ville de Berlin. Cette approche leur permet notamment de reproduire l'affaïssement de la structure centre-périphérie de la ville (chute du gradient de la densité) sur la période 1878-1945. Nous ne faisons qu'esquisser ces modèles à *espace continu*, car il nous semble qu'ils ont été peu abordés par rapport aux modèles à espace discret.

Poursuites du *regional modeling*. Les modèles du courant *regional integrative modeling*, à la Allen et Wilson (cf. section 3.3) continuent à faire l'objet de nouvelles applications et

d'opérationnalisations réussies [BCW⁺94], permises par la disponibilité accrue de données spatiales et l'essor des SIG. Disposer de données de meilleure qualité et en plus grand nombre entraîne moins d'incertitude sur la valeur à donner aux très nombreux paramètres qui caractérisent ces modèles, et qui en font à la fois une de leur force (l'opérationnalisation est à ce prix car elle ne peut se passer d'une description fine) mais aussi une de leur limite (leur complexité et leur manque de robustesse).

Evolution des AC. Nous avons vu les étapes successives de la formalisation de dynamiques géographiques à l'aide d'AC : d'abord des modèles *raster* [DCW64], puis des AC « pur jus » [Tob79, Cou85], puis des AC contraints et avec un voisinage étendu [WE93]. De très nombreuses applications urbaines pour simuler l'évolution des utilisations du sol ont vu le jour depuis, certaines avec une fonction de transition probabiliste, d'autres cumulant toutes les qualités isolées par Tobler, c'est-à-dire à la fois multivariés, géographiques, « historiques » (non markoviens), etc. En 2005, M. Battty dénombrait plus de cinquante applications de ce type [Bat05].

La plate-forme SPACELLE présentée dans [DPGL03] propose une généralisation intéressante de ce type de modèles. Il s'agit d'un outil dédié au calcul d'AC d'utilisations du sol dont la spécification est laissée à l'utilisateur. Celui-ci doit alors constituer la « base de connaissances » de l'AC : déclarer l'ensemble des états possibles des cellules (les utilisations du sol), les durées de vie associées à ces différentes utilisations (certaines peuvent n'être pertinentes et donc actives que pendant une sous-période du modèle), et les règles de transition. L'instanciation de ce meta-modèle a été notamment testée par une expérimentation concernant les règles d'évolution de l'espace urbain rouennais sur la période 1950-1994 [DPGL03]. Les configurations produites sont évaluées à deux dates (1966 et 1994) pour lesquelles les données sont disponibles.

Le lecteur intéressé par ces applications AC pourra trouver quelques exemples dans [Bat05], également dans [BT04] (chapitre 4), [PA⁺07], ou l'ouvrage [LP97], dédié à un historique et à la présentation d'un modèle et de son expérimentation. [Lan05] propose également un historique remontant jusqu'à une présentation du jeu de la vie. Notons au passage que même si les premiers papiers de géographes utilisant des AC mentionnaient tous le jeu de la vie en exemple, celui-ci n'a jamais été utilisé que pour illustrer comment des dynamiques complexes pouvaient apparaître à partir de règles simples, mais bien sûr pas comme un exemple de système géographique.

3.9 Bilan des modèles présentés

C : Continu ; D : Discret	Etat	Espace	Temps
Stocks & Flux	C	-	C
<i>Integrated Regional Modeling</i>	C	D	C
Premières microsimulations	D	D	D
Rasters	C	D	D
Automates cellulaires	D	D	D
Automates cellulaires contraints	C	D	D

TAB. 2 – Caractère discret (D) ou continu (C) de la représentation de l'état (i.e des variables d'état), de l'espace et du temps dans les modèles dynamiques présentés.

Poursuites bibliographiques. Tout en essayant d'illustrer la variété des familles de modélisation urbaine dynamique, nous n'avons fait ici qu'esquisser la description de modèles qui ont

été importants en ce qu'ils proposaient chacun une nouvelle approche de simulation pour tenter d'expliquer, comprendre ou prédire une ville en évolution. Nous les avons choisis parce qu'ils ont été les plus largement cités, commentés et appliqués dans le domaine. Le lecteur intéressé par une présentation plus en profondeur de ces modèles pourra se référer aux nombreuses présentations qui en ont été faites :

- chronologique et par formalismes [BT04, Bat05, Bat08] ;
- paradigmatique [Pum98] ;
- technique et applicative [PSJS89].

Nous avons abordé ces modèles à travers la notion de système dynamique et nous les avons classés suivant le caractère discret ou continu de la représentation du temps, de l'espace et de l'état du système. Notre présentation achronologique peut masquer des progressions qui se perçoivent en considérant ces modèles dans l'ordre chronologique de leur réalisation :

1. une progression vers une désagrégation spatiale des modèles (si l'on fait exception du modèle d'Hägerstrand) ;
2. une progression dans le sens d'un raffinement des mécanismes ;
3. une progression qui suit celle des paradigmes systémiques et de la complexité.

Pour laisser transparaître ces trois progressions, mais aussi par souci de concision, et enfin parce que la plus importante partie de notre travail de *conception de modèle* a été faite à ce niveau intra-urbain (cf. chapitre 5), nous n'avons intégré dans cet historique que des modèles intra-urbains et pas de modèles inter-urbains. Des états de l'art de modèles dynamiques de systèmes de villes peuvent être trouvés dans [Pum82, GP93, San92, Fav07].

Les deux premières de ces trois progressions ont été permises par le développement d'approches informatiques, les systèmes multi-agents en tout premier lieu, qui offraient un cadre pour faire de la simulation centrée sur les entités et leurs interactions, ainsi que par l'augmentation de la puissance de calcul permettant la simulation de tels modèles entité-centrés. C'est sur ces modèles que nous nous focalisons dans la section suivante.

4 Simulation urbaine dynamique, spatiale et à base d'agents

Nous qualifions d'*entité-centré* (en anglais : *individual based* ou *entity based*) les modèles dynamiques qui décrivent les systèmes géographiques en décrivant leurs entités constitutives et leurs interactions.

Individu-centré aux sens informatique et thématique. Comme l'a très clairement fait Sanders [San07], il nous faut tout de suite attirer l'attention sur le risque de confusion entraîné par l'usage du terme *individu-centré*. En effet dans un modèle informatique qualifié d'*individu-centré*, les « individus » (les entités) manipulés ne représentent pas nécessairement des individus humains (des personnes). Inversement un modèle peut être thématiquement qualifié d'*individu-centré* (il met le focus sur les individus d'une population humaine), sans pour autant qu'il soit informatiquement individu-centré (cas des modèles statistiques par exemple). Pour éviter cette confusion, nous privilégierons dans la suite le terme d'entité-centré, plus général, pour qualifier la propriété informatique de ces modèles.

Plan de la section. Dans la suite de cette section, nous délimitons des problèmes soulevés par la modélisation des villes à partir de la spécification de leurs entités composantes et de

leurs interactions. Nous évoquons la notion de *granularité* des modèles, et la prise en compte informatique des entités spatiales. En géographie, l'approche entité-centrée s'est imposée grâce au développement d'une approche informatique dédiée, les systèmes et la simulation multi-agents. Nous mettons en exergue ce qui selon nous explique la popularité du « cadre multi-agents », puis nous détaillons quelques modèles à base d'agents qui ont été développés à partir du milieu des années 1990.

4.1 L'approche entité-centrée

4.1.1 Modèles entité-centrés et SD

La simulation de systèmes dynamiques un peu complexes pose des difficultés techniques considérables qui débutent dès la description du système et la spécification de son évolution. Tant qu'ils étaient spécifiés et traités « à la main » par un modélisateur, les modèles devaient se restreindre à décrire un système à travers au plus une dizaine de variables reliées par des lois suffisamment régulières. Classiquement, on essaye d'extraire une forme analytique des trajectoires (par exemple dans le cas des équations différentielles) ou une caractérisation de certaines trajectoires particulières (limite asymptotique, point fixe, trajectoire périodique, etc.). L'approche « systèmes dynamiques » consiste à étudier des familles de trajectoires (partageant les mêmes propriétés) en fonction des valeurs prises par les paramètres du modèle¹⁸.

L'essor de l'informatique a permis de proposer, à côté de ces modèles mathématiques, des modèles informatiques permettant de décrire, à travers un programme de simulation, des centaines voire des milliers ou des dizaines de milliers de variables et leurs relations. La simulation permet de calculer explicitement leur évolution au cours du temps. Cette expressivité supplémentaire permet de définir des modèles beaucoup plus fouillés, en affinant la représentation des entités du modèle et leurs interactions.

Entité-centré et systèmes dynamiques. Ces entités peuvent représenter des objets géographiques divers : individu dans une population, mais aussi ménage, bâti, quartier, trafic routier, ville, etc. Ces objets ont une certaine autonomie en ce sens qu'ils peuvent être décrits de manière relativement indépendante, sans référer à *tout* le système. Ils sont caractérisés par un état qui évolue dans le temps. On peut donc aussi décrire ces modèles à l'aide de la notion de système dynamique. L'état global du système (le macroétat) est alors la conjonction des états des entités simulées (microétats) et de l'état de l'environnement éventuel dans lequel elles évoluent. La dynamique de tout le système est décrite non pas à travers une fonction d'évolution définie globalement, mais à travers la spécification du comportement de ses entités constitutives et de leurs interactions. Ces interactions ont un caractère généralement local, mais peuvent être soumises à des contraintes globales.

Modélisation procédurale et modélisation entité-centrée. Le modélisateur, face au système qu'il doit simuler, peut porter son attention sur les entités qui composent le système, ou bien sur les processus qui font évoluer ce système. Dans ce dernier cas on parle de *modèles procéduraux* ou *processus-centrés* [Wal77]. Comme exemple de cette différence nous pouvons citer les modèles d'économie qui manipulent des variables comme l'*employabilité*, qui ne cor-

¹⁸Dans cette approche, l'ensemble des états est vu comme un espace (avec une topologie, une mesure, une structure différentielle, et on fait de la géométrie avec des coordonnées pour chaque état...), et les trajectoires comme des objets géométriques que l'on étudie surtout qualitativement : quelles sont leur position relative, leurs propriétés (invariants), etc.

respond à rien d'observable directement, par distinction avec les modèles qui représentent les emplois et qui manipulent des entités directement perceptibles.

Entités directement perceptibles. En effet, les modèles centrés sur les entités mettent généralement le focus sur les entités qui sont le plus immédiatement perceptibles (*i.e.* souvent les composants physiques du système). En conséquence, *le processus est second par rapport aux entités*. Ces modèles ont de nombreux avantages, ils sont plus pédagogiques et correspondent à une approche plus anthropomorphique. Ils sont plus immédiats et plus simples à appréhender que les processus-centrés, ces derniers mettant le focus par exemple sur des flux qui ont lieu dans le système, et qui peuvent être plus difficiles à percevoir.

Il est classique d'opposer ces deux propriétés. Les outils informatiques sont neutres par rapport à ces choix de modélisation : des entités informatiques peuvent aussi bien correspondre à des processus du système qu'à des composants physiques de celui-ci. C'est un peu une question de « style ». Il y a toutefois des choses plus faciles à décrire d'un point de vue que de l'autre.

4.1.2 Modélisation entité-centrée et modélisation agrégée

Les modèles entité-centrés sont également souvent opposés aux modèles qualifiés d'agrégés. Deux exemples paradigmatiques sont apportés par la physique statistique et la chimie.

Modélisation d'un volume de gaz. En physique statistique la modélisation d'un volume de gaz peut se faire par la modélisation de chacune des molécules du gaz (décrite par sa position et sa vitesse). Un tel modèle est entité-centré et s'oppose au modèle agrégé, qui décrit le gaz par seulement trois variables : le volume, la température et la pression. Le modèle agrégé ne considère que des moyennes (la température par exemple est reliée à la vitesse moyenne des molécules), et il est bien plus « économique » que le modèle entité-centré (la description du système passe de l'ordre de 10^{23} variables à seulement 3). Il permet d'exprimer des relations simples (la loi des gaz parfaits), alors que le modèle entité-centré n'exhibe que des trajectoires erratiques (chaque molécule a un mouvement brownien). Avec beaucoup de travail, le modèle agrégé peut se déduire du modèle entité-centré : il est donc moins riche en informations sur le système, mais il adresse des variables macroscopiques qui sont facilement mesurables sur un système réel. Il permet aussi des simulations peu coûteuses et il permet d'en tirer des lois (la loi des gaz parfaits).

Modélisation de solutions chimiques. Notre deuxième exemple est tiré de la chimie. Là aussi les modèles qualifiés d'entité-centrés se focalisent sur la représentation explicite des molécules. De tels modèles ne sont accessibles à la simulation que pour des solutions extrêmement diluées. Une approche agrégée remplace la représentation individuelle des molécules par une seule variable, la concentration. Cela implique l'homogénéité du comportement des molécules (d'un produit donné). Les simulations entité-centrées de réactions chimiques sont coûteuses et sont donc réservées aux cas où cette hypothèse ne peut être faite (par exemple quand le très faible nombre de molécules ne permet pas de négliger les fluctuations statistiques dans les réactions).

Pour revenir à la géographie, dans les modèles dynamiques que nous avons présenté dans la section précédente, figurent à la fois des modèles que nous avons qualifiés d'agrégés et d'autres d'entité-centrés. Par exemple il paraît intuitif de qualifier d'agrégé le modèle de stocks et de flux sans espace de Forrester, et d'entité-centré le modèle de microsimulation, de même que l'automate cellulaire contraint (qui lui est en plus espace-centré). Cette distinction est extrêmement commune dans la littérature. Toutefois, « agrégé » et « entité-centré » sont deux propriétés qui

peuvent s'intersecter. Par exemple, dans quelle classe placer les modèles d'Allen et de Wilson ? Bien que proposant une discrétisation de l'espace en plusieurs zones, chacune caractérisée par ses propres variables d'état, ils sont souvent rangés du côté des modèles agrégés, en tout cas dissociés des modèles proposant une représentation cellulaire plus fine de l'espace (voir par exemple les grilles de classification des revues mentionnées dans 3.9). Pour certains auteurs, les seuls modèles entité-centrés pertinents sont ceux dont les entités représentant des individus considérés comme relativement autonomes, pourvus d'intentionnalité et d'un certain degré de rationalité (cf. section 4.6). Les limites de ces propriétés sont floues et il nous faut affiner cette opposition.

Exemple du PIB. Prenons un exemple : le PIB (produit intérieur brut) d'un pays est une variable qui peut être agrégée / désagrégée ¹⁹, par exemple en PIB de toutes les communes du pays (maillage complet), auquel cas le modèle devient moins agrégé. On peut continuer à désagréger en décomposant le PIB d'une commune comme la somme du produit économique de chacun de ses résidents. On aura alors un modèle on ne peut plus désagrégé, on ne peut plus entité-centré (ici individu-centré) pour cette variable. Dans ce raffinement progressif, à partir de quand peut-on considérer que le modèle est entité-centré ?

Continuité et granularité des entités. Cette question n'est pas très pertinente du point de vue de la *mise en oeuvre de la simulation*. Dans l'exemple précédent, tous les modèles peuvent être qualifiés d'entité-centrés, ils manipulent des entités différentes. Imaginons cette fois un modèle qui calculerait l'évolution du PIB d'un pays comme la somme de deux termes, l'évolution de chacun de ces termes étant formulée à l'aide d'une équation différentielle. Ces deux termes pourraient représenter le PIB du secteur privé et celui du secteur public (ou encore celui des villes et celui des campagnes, Paris/province, etc.). Ce modèle serait entité-centré au sens de la définition précédente, deux entités y sont représentées, chacune caractérisée à l'aide d'une variable d'état. On voit donc qu'il y a en fait un continuum, une *échelle d'agrégation* et de modélisation, sur laquelle on peut positionner plusieurs *niveaux*. On parle de la *granularité* des entités pour qualifier le niveau de la simulation : plus la granularité est fine, plus les entités représentées sont proches des constituants physiques élémentaires du système. Plus les entités à représenter sont de granularité fine (donc plus nombreuses), plus les simulations sont coûteuses en temps et en mémoire. Les modèles agrégés apparaissent donc souvent comme des « simplifications » des modèles entité-centrés permettant la simulation.

4.1.3 Deux idées naïves sur l'entité-centré

« **L'immédiateté de la modélisation permet un gain en compréhension du système étudié.** » Cette immédiateté peut au contraire être une barrière à la perception des mécanismes fondamentaux de l'explication. Par exemple si l'on décrit une machine uniquement à partir de ses composants et de la façon dont ils sont assemblés, on ne va pas nécessairement percevoir clairement la fonction d'ensemble, qui est ce pourquoi on l'achète. L'immédiateté est alors « l'arbre qui cache la forêt » : on représente de très nombreuses entités mobiles et interagissantes parce qu'on dispose d'un outil qui peut les calculer à notre place et que l'on a facilement accès aux mécanismes d'interaction, mais dans quelle mesure cette immédiateté va-t-elle compenser ce que l'on perd par absence d'abstraction ? Les savoirs disciplinaires se construisent en dégageant progressivement, depuis les entités immédiatement perceptibles, des concepts plus abstraits mais

¹⁹Par distinction avec les variables qui ont des effets de composition qui empêchent plus ou moins cette agrégation (par exemple les migrations, la mobilité)

qui possèdent un fort potentiel explicatif. En mécanique par exemple, la quantité de mouvement (masse×vitesse) ou l'énergie sont des variables plus abstraites, moins immédiatement perceptibles et mesurables que la vitesse. Si l'on se cantonne uniquement aux entités immédiatement observables, des lois comme celles de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement ne peuvent pas être formulées [Fey80].

« **Les modèles entité-centrés sont plus coûteux à calculer.** » Donnons deux exemples qui remettent en question cette affirmation.

Hashlife. *Hashlife* [Gos84, Wik10a] est un algorithme conçu et implanté au début des années 1980 par Bill Gosper du MIT. Il permet de calculer de manière optimisée l'état à très long terme auquel aboutira une configuration initiale d'un jeu de la vie [Con70] (plus généralement d'automates cellulaires) beaucoup plus rapidement qu'un algorithme qui calculerait la suite exhaustive des états intermédiaires. Il exploite les nombreuses redondances dans l'espace et dans le temps qui apparaissent dynamiquement dans la grille, ainsi que des propriétés du jeu de la vie (par exemple la densité de cellules vivantes dans une région est égale au plus à la moitié du nombre de cellules de cette région) (cf. figure 2.9).

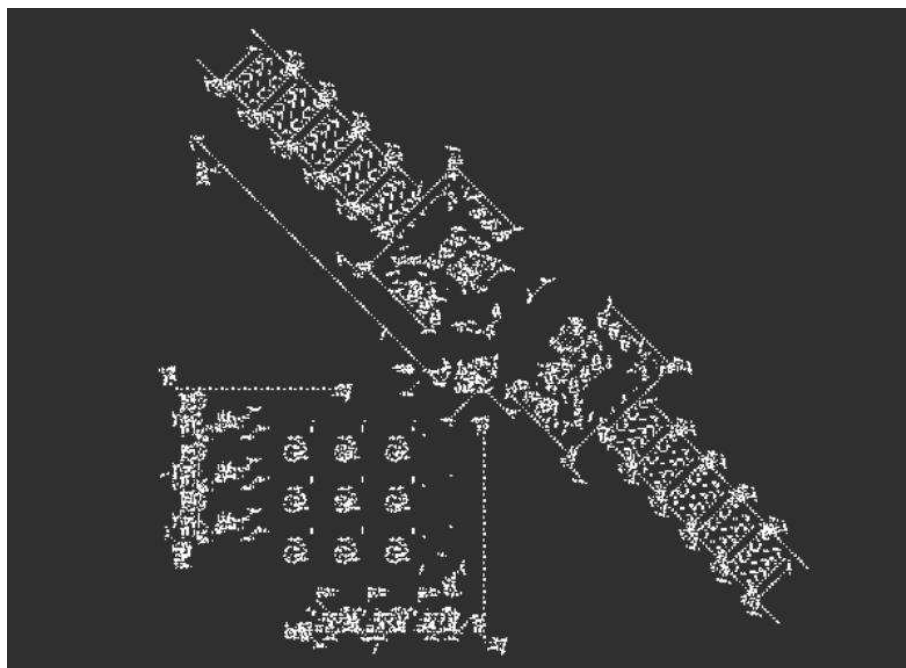


FIG. 2.9 – La 6 366 548 773 467 669 985 195 496 000^{ème} (6.10^{27}) génération d'un motif très compliqué du jeu de la vie de Conway, calculé en moins de trente secondes sur un PC équipé d'un processeur Intel double coeur 2GHz (PC standard en 2010), à l'aide de la version de *HashLife* implanté sur la plate-forme Golly. La performance est permise par la détection d'un cycle dans le motif, ce qui permet de sauter très rapidement à un instant futur arbitraire [Gos84, Wik10a].

La stratégie Gillespie. L'approche usuelle pour simuler l'évolution d'un système chimique est de représenter ce système par la concentration des produits présents et de résoudre numériquement les équations différentielles qui décrivent les réactions.

Cette approche n'est pas pertinente quand il y a très peu de molécules présentes : en effet, les réactions chimiques sont des processus stochastiques qui dépendent du choc entre les molécules. Ce n'est que quand il y a un grand nombre de molécules que l'on peut moyenner les effets du mouvement brownien et en tirer une relation continue entre les concentrations.

En cas de très faible concentration, ou si l'on a besoin de tenir compte des fluctuations statistiques, il faut se tourner vers une simulation entité-centrée où l'on représente *a priori* chaque molécule, ce qui limite la simulation à des systèmes de très petite taille.

Cependant, Daniel Gillespie a montré [Gil77] comment on pouvait simuler l'évolution discrète et stochastique du système (à un niveau moléculaire donc), de manière exacte, sans représenter explicitement les molécules de chaque espèce chimique. Il faut pour cela que le système soit homogène (bien mélangé). Dans ce cas, il est possible de calculer (en probabilité) à un instant donné, la prochaine réaction à se produire et le délai pour qu'elle se produise. Ce calcul nécessite simplement de connaître le nombre de molécules dans chaque espèce (et les constantes de réactivité de chaque réaction). Il est ainsi possible de simuler l'évolution stochastique du système, sans modéliser explicitement la trajectoire de chaque molécule. Cette approche est donc bien plus efficace qu'un modèle entité-centré naïf (le temps de calcul de la prochaine réaction est indépendant du nombre de molécules). L'algorithme de Gillespie se généralise à d'autres processus stochastiques. Il faut cependant que cette propriété d'homogénéité soit respectée.

4.2 Modélisation entité-centrée et modélisation espace-centrée

Entité-centré vs. agrégés, espace-centré, processus-centré. . . Les modèles possédant la propriété d'être *entité-centrés* sont souvent opposés aux modèles qualifiés d'*agrégés*, dans lesquels les caractéristiques des entités dans une population sont moyennées, et où le modèle exprime les évolutions de ces moyennes. Mais plutôt que de les opposer, il est plus pertinent de considérer la *granularité* des entités représentées, et le continuum qui relie ces deux classes de modèles. De plus, la propriété *entité-centré* d'un modèle est souvent considérée comme exclusive d'autres propriétés, comme celles d'être *espace-centré* ou *processus-centré*. Si les entités d'un modèle entité-centré ont une inscription spatiale fixe (éléments de bâti, quartier, ville), on peut alors également parler de *modèles espace-centrés*. Ils reposent alors sur des représentations discrètes (graphe) ou continues (coordonnées, champs, régions) de ces entités spatiales et des relations spatiales. Enfin un modèle entité-centré peut aussi représenter des entités plus abstraites comme des flux (de biens, de personnes) ou des fonctions économiques. Ces différentes qualités ne sont donc pas exclusives : ce sont des *propriétés* qu'un modèle peut posséder, elles ne forment pas une partition des modèles.

Les entités des modèles entité-centrés peuvent représenter des portions de l'espace géographique. Par exemple, [AS79] discrétise la ville en 50 entités qui correspondent à des régions urbaines, [DCW64, Tob79, WE93] en plusieurs centaines à milliers d'entités qui représentent des zones de mêmes dimensions de l'espace urbain. De tels modèles qui mettent le focus sur l'espace et ses changements ont la propriété d'être *espace-centrés*.

Modèles espace-centrés et automates cellulaires. Nous avons vu que les automates cellulaires (avec des hybridations) sont un formalisme de calcul beaucoup utilisé en géographie pour faire des modèles espace-centrés. Il existe un certain recouvrement entre la notion d'automate cellulaire et celle de modèle entité-centré. Un automate cellulaire peut se voir comme un modèle entité-centré où les entités sont les cellules qui partitionnent l'espace. Ces cellules (entités) sont de même type et leur règle d'évolution est identique (toutes les entités ont le même comportement). Les AC se sont inscrits dans la lignée des approches précédentes pour faire des modèles espace-centrés, tout en permettant deux choses nouvelles : une emphase particulière sur le rôle

des unités spatiales voisines dans la fonction de transition d'une unité spatiale du système, et un partitionnement de l'espace en un nombre beaucoup plus grand d'unités. De plus, les modèles AC sont en général plus restreints que d'autres approches espace-centrées dans le nombre de processus qu'ils prennent en compte.

Ces caractéristiques (location fixe des entités, identité des entités) font qu'ils sont souvent distingués des approches offrant un cadre moins contraint et permettant de représenter une plus grande gamme de modèles entité-centrés, notamment tous ceux où les entités représentées sont diverses et mobiles, et « habitent » un espace. Mais dans certains cas on peut utiliser un automate cellulaire pour représenter des entités mobiles. Par exemple, le modèle de Schelling représente des entités (des ménages) mobiles dans l'espace (la ville), mais opérationnellement il est modélisable par un automate cellulaire dont les états peuvent être « cellule vide », « cellule occupée par une entité de type T_1 » et « cellule occupée par une entité de type T_2 ».

Approches lagrangienne et eulérienne. En fait les deux points de vue entité-centré et espace-centré rappellent la distinction entre les approches lagrangiennes (1) et eulériennes (2) dans la modélisation mathématique de systèmes physiques. Le choix de représenter informatiquement par l'entité ou par l'espace support est une question de point de vue : soit on place le focus sur les entités et leurs interactions spatiales (1), soit sur l'espace support de ces dynamiques (2). En quoi cela change-t-il l'application ? En fait, on décrit le même phénomène, mais de deux points de vue différents : c'est en quelque sorte une question de « style » [TMPP01, BG99]. L'informatique est neutre, c'est un langage qui peut exprimer les deux points de vue.

Conséquences opérationnelles. La différence la plus significative entre les deux approches réside donc plutôt dans la technique adoptée pour faire progresser la simulation : est-ce que toutes les régions de l'espace sont considérées, ou bien considère-t-on plutôt les entités qui les habitent ? Cette différence stylistique peut avoir un impact sur l'expression des phénomènes à simuler mais aussi sur les performances de la simulation.

Prenons l'exemple d'un jeu de la vie s'exécutant sur une grille de grandes dimensions, par exemple 1000×1000 . Si nous le représentons par la case, donc par l'espace support (représentation matricielle des 10^6 cellules), le programme peut passer beaucoup de temps à « ne rien faire ». En effet, si il n'y a que quelques cellules vivantes, la majeure partie du temps de calcul sera passé à boucler sur les cellules mortes pour décider de les laisser dans cet état. En revanche, si nous le représentons par l'entité (dans le cas du jeu de la vie, uniquement les cellules vivantes), à chaque pas de temps, on ne calculera que « ce qui est nécessaire ». La *structure de l'état* du système sera alors dynamique (on doit créer des entités quand des cellules mortes deviennent vivantes, et en détruire dans le cas inverse), et la gestion des relations spatiales devra être plus sophistiquée (chaque entité maintient sa propre liste de voisins).

4.3 Difficultés posées par l'approche entité-centrée

Cette prise en compte croissante des détails a cependant un prix :

1. Faire des modèles à des niveaux de plus en plus désagrégés nécessite de recueillir énormément de données, de les traiter, de les relier ;
2. Les interactions entre entités peuvent être extrêmement variées. Les lois utilisées pour décrire l'évolution du système ne sont pas des fonctions régulières, continues, uniformes. On a alors à traiter des entités et des interactions discrètes en très grand nombre, qu'on ne peut pas « capturer » avec une fonction simple, possédant de bonnes propriétés (continue,

linéaire, etc.), ce qui rend difficile la description du système, et ensuite le raisonnement (ici, extraire de la connaissance géographique) ;

3. D'un point de vue plus technique, une approche entité-centrée nous fait spécifier de nombreuses entités, mais comment traiter leurs trajectoires ? Les mathématiques savent traiter des grandes quantités d'objets, mais principalement via des approches stochastiques. Quand les choses ne le sont pas, comment les décrire ? On est souvent réduit à la seule simulation, ce qui donne des informations sur une évolution particulière, mais pas sur le comportement générique du système.

Si l'on met de côté ce caractère possiblement coûteux des simulations entité-centrées, le problème principal devient la définition expressive et efficace d'entités diverses et aux interactions variées. C'est là que les modèles entité-centrés rencontrent l'approche SMA en informatique.

4.4 Les systèmes multi-agents (SMA)

Au début des années 1990, les modèles entité-centrés rencontrent la branche simulation des systèmes multi-agents, qui sont alors un domaine émergent de l'IAD (Intelligence Artificielle Distribuée) et de l'informatique, particulièrement adapté pour faire de la simulation entité-centrée. Nous pouvons dire que les SMA sont (au moins) à la fois :

1. *une approche de calcul, un vocabulaire, un style* pour modéliser des problèmes distribués, et pour structurer l'information que l'on a sur un système réparti ;
2. *des techniques de résolution distribuée de problèmes* ;
3. *une ingénierie logicielle*, qui permet une modularisation et une réutilisation (via des langages, des bibliothèques, des plates-formes).

Il faut admettre que la branche simulation de la géographie, quand elle a rencontré les SMA, a essentiellement rencontré le côté stylistique et le vocabulaire, moyennement le côté ingénierie logicielle, et très peu le côté résolution distribuée de problèmes²⁰ [DVM02].

Expressivité et performance d'approches de simulation entité-centrées. Concernant le premier point, nous pouvons nous demander pourquoi l'approche multi-agents a eu un tel écho en simulation géographique, alors que les approches objets (et acteurs), qui l'ont chronologiquement précédé en IAD, et qui ont abouti à des réalisations techniques plus largement diffusées (en termes de langages notamment), sont restés relativement confidentielles dans le domaine à l'époque de leurs développements.

²⁰Mais la géographie ne fait pas figure d'exception : plusieurs auteurs ont déjà souligné qu'en simulation les architectures d'agents computationnels sont peu utilisées, et qu'à ce jour les agents ont plutôt joué un rôle métaphorique lors de l'analyse d'un problème et la conception de modèles (métaphore du robot, métaphore de la colonie de fourmis, etc.) [TMPP01]. Il nous semble qu'il existe en fait des communautés de recherches distinctes et qui s'intersectent peu. D'un côté celle des SMA, communauté d'informaticien(ne)s qui conçoivent des architectures logicielles dotées de propriétés désirées (autonomie, adaptabilité, robustesse, auto-organisation, auto-réparation, etc.). Les SMA en informatique abordent bien plus de problématiques que la seule utilisation des agents en simulation (voir notamment les actes des conférences annuelles AAMAS (internationale) et JFSMA (nationale)). De l'autre côté, des communautés multiples et « internes » à différentes disciplines, de modélisation et simulation à base d'agents (voir par exemple les quatre premiers chapitres de [TDZ08] pour une entrée pluri-disciplinaire sur la modélisation et simulation à base d'agents). En simulation géographique, une comparaison bibliographique préliminaire, portant sur une dizaine de revues et d'actes de conférences francophones pour la période 2003-2008, nous a permis d'établir qu'une proportion marginale d'auteurs publient dans les deux communautés. Une étude plus rigoureuse et de plus grande envergure reste à faire pour mieux éclairer les passerelles existant entre avancées informatiques sur les SMA et leur utilisation en simulation.

En géographie, le développement de la simulation entité-centrée s'est produit à partir du milieu des années 1990²¹. Une raison souvent invoquée met en avant les capacités de calcul alors nouvellement accessibles. Il faut nuancer cet argument car cela dépend, outre la complexité des entités et processus modélisés, des moyens matériels et logiciels que l'on se donne. D'un point de vue opérationnel, les modèles agents sont actuellement et pour une part importante implémentés avec des langages à objets [DVM02, BAN05, TDZ08]. Ces langages sont nés à la fin des années 1960 (première version de Simula en 1967), et ont connu une diffusion importante dans le monde académique et industriel dans les années 1980 et 1990 avec SMALLTALK-80, C++ puis Java. Les modèles à base d'agents que nous présentons ensuite ne nous semblent pas très gourmands en termes de ressources de calcul, au vu du nombre et de la complexité de leurs entités et de leurs comportements. Les visualisations mises à part, nous pensons pouvoir dire *a posteriori* que l'état de l'art technique du début des années 1980 permettait d'envisager d'implémenter de tels modèles. Certaines réalisations de modèles intégrés (utilisations du sol et transports) de cette époque, optimisées pour être exécutés sur de petits ordinateurs, tendent à renforcer cette impression [DLBPV84].

Vocabulaire multi-agents et sérendipité. Il nous paraît plus raisonnable de mettre en avant, outre le temps de diffusion de l'innovation (sélection et apprentissage), la *sérendipité* [vAB08] des acteurs, *i.e* la capacité à reconnaître ce qui va éclairer la recherche lorsque l'on s'y trouve exposé. C'est ce qui nous amène à défendre l'idée que le *vocabulaire multi-agents*²², plus que les possibilités techniques informatiques nouvelles associées aux agents, a été déterminant dans l'orientation des SHS vers les SMA. Ce vocabulaire résonne avec celui des sciences humaines et sociales. La synthèse des avantages de l'approche, tels qu'ils sont mis en avant dans [San06, San07, Bat05, BT04, Pum98], fait ressortir :

- la malléabilité et la puissance expressive (car largement anthropomorphique) des concepts au coeur des SMA, ce qui permet une plus grande appropriation du modèle par le thématicien ;
- l'approche distribuée et la spatialité explicite ;
- le niveau de raffinement arbitraire dans l'expression des interactions spatiales, choisi par le modélisateur ;
- l'immédiateté de la conception grâce à la possibilité d'instancier chaque acteur/objet géographique d'intérêt par un agent ou un objet informatique ;
- la possibilité d'articuler plusieurs niveaux d'organisation et de rendre compte de causalités ascendantes (*bottom-up*), des entités au collectif, et descendantes (*top-down*), du collectif aux entités ;

La première mise à part, chacune de ces qualités est techniquement aussi celle d'une approche à base d'objets. Mais le choix des mots est crucial : un discours construit autour des concepts d'objets et de messages est moins expressif sur une question de sciences sociales qu'un discours à base d'agents et d'interactions.

Ingénierie logicielle multi-agents et simulation géographique. Concernant l'ingénierie logicielle, ce sont plutôt les SIG, plus que les architectures de simulation multi-agents, qui ont eu un impact sur les modèles, notamment pour ce qui est de la représentation de l'espace. Ce sont

²¹ même si nous avons vu que la microsimulation (individus-centré) est née bien avant, et qu'il existe une école suédoise déjà active dans les décennies précédentes [HS01].

²² *agents, interaction, organisation, émergence, coopération, négociation, ...*

d'ailleurs plutôt les SIG qui commencent à intégrer des greffons pour simuler des sociétés d'agents à l'intérieur du SIG [CL00]²³. L'inverse commence à se faire également (les dernières versions de *Netlogo* et de *GAMMA*, et *Repast* depuis sa version 3, intègrent par exemple le support de bases de données spatiales). Concernant les bibliothèques et plates-formes de développement de modèles, il semble que des outils simples à prendre en main, et plus facilement accessibles (*Netlogo*) ont bénéficié d'une diffusion plus large que des outils plus ambitieux d'un point de vue multi-agents, notamment en termes de meta-modèles organisationnels (*Madkit* [GF98, GF00], *Cormas* [BBPLP98], *Mimosa* [Mül04], ou *Swarm* [MBLA96]) [TDZ08, RLJ06].

Enfin la rencontre faible avec les techniques de résolution de problèmes est logique dans la mesure où dans la plupart des cas, les entités et les processus simulés ne se prêtent pas intuitivement à l'utilisation de ces techniques.

4.5 Modèles urbains dynamiques avec agents

Dans cette section, après avoir proposé une définition de modèle à base d'agents, nous proposons quelques exemples de modèles géographiques entité-centrés exprimés à l'aide d'agents. Nous présentons d'abord les plus désagrégés, qui manipulent des entités atomiques pour la discipline (individus, bâti), en allant progressivement vers des modèles dont les agents représentent des agrégats, des entités collectives.

4.5.1 Définition d'un modèle à base d'agents

Nous reprenons ici la définition d'un modèle à base d'agents proposée par [TDZ08] :

« Tout modèle à base d'agents est un système composé d'entités multiples ou *agents* qui évoluent dans un *environnement*, conçu comme une entité particulière, dans lequel ils sont localisés. Ces agents sont dotés d'*attributs*, de *comportements*, et de capacités de *perception* et de *communication*. L'ensemble des valeurs des attributs d'une entité à un instant donné constitue l'*état* de cette entité, et la réunion de l'ensemble des états des entités forme l'*état microscopique* ou _dit plus simplement_ l'*état du système*. Les capacités de perception des entités leur permettent de consulter un sous-ensemble de cet état microscopique, habituellement de façon localisée dans l'environnement. Les comportements sont des règles contrôlant à chaque instant l'évolution de cet état en intervenant sur les états des entités qui les portent ou sur leur existence même (création et destruction), ainsi que sur les états et existences des autres entités intervenant dans les éventuelles *actions*, *communications* ou *interactions* décrites dans les comportements. »

4.5.2 Représenter des individus en mouvement dans la ville par des agents

Le projet MIRO est développé par A. Banos, S. Chardonnel, T. Thévenin et leurs collègues [BT08]. Ils partent des résultats d'une enquête ménages-déplacements, dont le principal élément quantifié est une matrice Origine-Destination. Le manque principal de ces enquêtes ménages-déplacements est l'absence d'informations précises sur la localisation des individus interrogés et sur le détail des itinéraires effectués. Leur but est donc de reconstituer virtuellement des trajectoires individuelles réalistes sur les réseaux de circulation d'une ville, pendant une journée-type de semaine. Régénérer cette « fourmilière urbaine » leur permet de mesurer dans le temps

²³ même si il a fallu du temps pour que les SIG intègrent d'autres modèles, même simples, de l'analyse spatiale, ainsi que des modèles dynamiques.

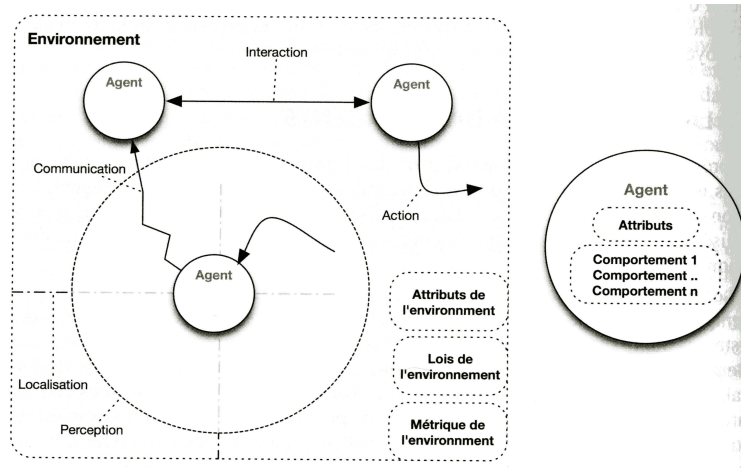


FIG. 2.10 – Représentation diagrammatique des composantes d'un modèle à base d'agents (extrait de [TDZ08]).

comment évoluent les polarités dans l'espace, et également de mesurer les effets de ces mobilités individuelles sur l'encombrement du réseau et sur la pollution générée.

L'argument principal invoqué pour une approche désagrégée jusqu'au niveau des individus est l'inadéquation des indicateurs existants pour refléter la variabilité croissante des comportements de mobilité, et donc leur inadaptation aux nouveaux enjeux posés par l'évolution de ces comportements individuels (étalement urbain, pollution engendrée par l'allongement des distances parcourues au quotidien).

Cette approche de la mesure des effets de la mobilité individuelle a été testée sur la ville de Besançon. Dans un premier temps la ville est virtuellement reconstituée à l'aide d'un système d'information géographique qui articule le réseau viaire, le bâti et les localisation des activités quotidiennes (résidences, lieux d'études, entreprises, loisirs, commerces). Ensuite, un champ de potentiels est surimposé à la structure « physique » de la ville pour ventiler spatialement les populations.

4.5.3 Représenter des services en compétition spatiale par des agents

Dans cette catégorie figure le modèle de Nagel et ses collègues [NSPB00], qui cherche à reproduire les motifs de localisation de services et commerces dans un contexte de compétition spatiale, ainsi que les processus de formation des prix. Le modèle intègre des agents économiques mobiles, qui représentent des sociétés de services, et des agents fixes, qui représentent des ménages consommateurs de ces services.

L'espace urbain est représenté comme une grille régulière dont chaque cellule représente un emplacement qui peut soit héberger un ménage soit être vide de toute occupation. Sur cet espace à structure fixe et régulière, les services sont représentés par des agents mobiles qui peuvent se déplacer dans tout l'espace. A chaque instant, chaque service a une perception globale de l'ensemble de l'environnement pour choisir où s'implanter. Un service peut fermer parce qu'il perd trop d'argent, ou bien parce qu'il perd trop de consommateurs. Les ménages, fixes, choisissent le service le plus proche en fonction de l'information perçue dans leur voisinage. Ils peuvent changer de service, et ne sont clients que d'un service à la fois.

Une itération du modèle consiste en cinq étapes :

1. la résolution du marché d'échanges entre services et ménages ;
2. la prise de décision sur le maintien ou la fermeture des services en fonctions de leur bilan ;
3. l'évolution des prix pratiqués par chaque service ;
4. l'introduction de nouveaux services à des localisations aléatoires ;
5. enfin l'appariement des ménages aux services en fonction de ces nouveaux prix.

Les motifs d'organisation dynamiquement générés sont analysés à travers la taille moyenne des clusters de services formés, et la convergence des prix pratiqués par les services vers un équilibre. Ces motifs sont comparés à des indicateurs équivalents de l'économie états-unienne.

Les agents servent à représenter des entités décisionnelles et au comportement individualisé et à rationalité limitée.

4.5.4 Représenter des ménages et des logements par des agents

Un exemple très connu de ce type est un modèle centré sur les phénomènes de ségrégation résidentielle entre populations arabes et juives, dans le quartier nommé Yaffo de la ville de Tel-Aviv [BOH02]. On peut en trouver une présentation dans [San06].

Il particularise les modèles classiques entité-centrés de ségrégation sociale de type Schelling. Comme dans ces derniers, le modèle cherche à reproduire le comportement résidentiel des ménages, représentés par des agents mobiles. Les agents-ménages sont de deux types, arabe et juif. Ils évoluent dans un espace virtuel qui reproduit exactement les infrastructures spatialisées jusqu'à l'échelle des logements individuels, qui sont représentés par des objets décrits par leur style architectural, les coordonnées spatiales de leur centroïde, et implicitement par leur voisinage. Ces zones de l'espace discrétisé sont ensuite également différenciées par les agents qui y sont localisés.

L'utilisation d'un SIG, avec les vraies coordonnées spatiales des logements et des rues, permet une définition plus réaliste des voisinages, ce qui constitue une vraie amélioration pour ce type de modèle, dont l'hypothèse est celle d'un choix de localisation en fonction de la composition du voisinage. Dans ce cas précis, l'espace est discrétisé au moyen de polygones de Voronoï dont les centres correspondent aux coordonnées spatiales des logements (issues des bases de données spatiales fournies par le recensement). De cette façon la notion de voisinage peut être affinée : sont considérés comme voisins les logements dont les polygones ont une frontière commune, et qui de plus ne sont pas séparés par une route.

A chaque pas de temps, les ménages sont traités indépendamment. Chacun calcule pour son logement la valeur d'une fonction de désutilité, qui traduit à quel point un ménage est insatisfait de son logement actuel. Cette fonction tient compte de la composition ethnique du voisinage. Si la valeur est au-delà d'une valeur seuil paramétrée, les ménages décident de déménager. Dans ce cas, le choix d'un nouveau logement se fonde sur les valeurs obtenues par cette même fonction de désutilité. On considère que les ménages ont une information parfaite et l'ensemble du quartier est considéré, la distance ne constitue pas un frein. La fonction de choix n'est pas déterministe mais probabiliste. La comparaison des résultats obtenus s'effectue en comparant avec les données les compositions ethniques simulées au niveau des îlots du quartier.

Ici encore, les agents sont mobilisés pour représenter des entités décisionnelles, mobiles, et « atomiques », immédiatement perceptibles : les ménages. La définition des comportements des agents est appuyée par des enquêtes. De très nombreux modèles de la mobilité résidentielle de ce type existent, où chaque ménage est représenté par un agent mobile et où les logements sont représentés soit une cellule dans un automate cellulaire.

4.5.5 Représenter des *groupes statistiques* de ménages et de logements par des agents

Sur ces questions de mobilité résidentielle, J. Quijano, M. Piron et A. Drogoul ont proposé une simulation de la ségrégation urbaine dans la ville de Bogotá [GQPD07b], mais à un autre niveau d'organisation, original, celui de *groupes statistiques* de logements et de ménages. Les agents sont mobilisés pour représenter des entités composites, définies comme des classes statistiques réifiées dynamiquement, et donc plus agrégées que celles intégrées dans les modèles précédents. Il s'agit d'un modèle multi-niveaux sur lequel nous revenons en détails dans le chapitre 6.

Les résultats des simulations ont été validés à partir du calcul de la corrélation entre les distributions spatiales réelles et simulées pour la dernière année simulée pour laquelle les données sont disponibles (1993), sur des modes statistique et cartographique. Ces résultats démontrent notamment une bonne stabilité des mécanismes développés et une bonne capacité de reproduction de la distribution spatiale de la population pour la date finale de la période simulée.

4.5.6 Représenter des quartiers par des agents

Accessim, que nous présentons de façon détaillée dans la section suivante, fait partie de cette catégorie. Il a la particularité d'intégrer des agents correspondant à des entités situées à de multiples niveaux d'organisation spatiale :

1. à un niveau *micro* des individus, qui parcourent un réseau à la recherche de services, lesquels peuvent leur fournir la ressource nécessaire à leur satisfaction ;
2. à un niveau *méso*, les localisations et la qualité des services est collectivement et spatialement mémorisée dans les quartiers, des entités territoriales qui font sens dans les phénomènes de diffusion ce type d'information (réputation des services de proximité concurrents).

4.5.7 Représenter des villes par des agents

Dans les modèles précédents, les agents sont mobilisés lorsqu'il devient nécessaire de représenter des entités spatialement mobiles (piétons se déplaçant, ménages déménageant, firmes se (re)localisant). Mais la pertinence du cadre multi-agents ne se restreint pas à la simulation des mobilités, il est également justifié pour simuler des villes au sein de systèmes de villes, car celles-ci possèdent les propriétés essentielles des agents (cf. chapitre 4 section 2).

Le modèle Simpop, première application des SMA à la géographie [BGPM⁺96], a cela de particulier que chaque agent représente une ville, une entité spatialement située mais immobile. Les spécialistes francophones des SMA ont tôt entendu parler de ce modèle, il figure en effet parmi les exemples d'application de la simulation multi-agents dans l'ouvrage pionnier de J. Ferber [Fer95].

L'objectif de ce modèle était de reconstruire un système de peuplement sur le très long-terme, sa différenciation et sa structuration, spatiale et fonctionnelle, sous l'effet de l'introduction dans le système d'innovations inégalement captées par les noyaux urbains. Le modèle a été appliqué à la région lyonnaise. Nous ne rentrons pas plus dans les détails car il se subsume sous son successeur Simpop2, sur lequel nous reviendrons dans le chapitre 4.

La table 3 récapitule les types d'entités représentées par des agents dans les modèles présentés.

Notre passage en revue des modèles de ville à base d'agents a été assez superficiel, mais nous reviendrons sur certaines applications de façon plus détaillée et à titre comparatif dans les chapitres ultérieurs. D'autres présentations et grilles d'analyse, plus complètes, de modèles

Modèle	Entités
MIRO	Individus
Yaffo	Ménages et logements
SimulBogota	Groupes statistiques de ménages et de logements
Accessim	Individus et quartiers
Simpopl	Villes

TAB. 3 – Illustration de la variété dans la granularité des entités représentées par des agents dans les modèles urbains entité-centrés.

agents en géographie ont été notamment proposées par [Dau05, San07, BT04, Bat05, Mar06, GQPD07b, Van03].

4.6 Objectifs poursuivis par la simulation urbaine

La simulation en tant que pratique scientifique peut avoir de nombreux objectifs. F. Varenne en a par exemple dénombré plus d'une vingtaine [Var07]. Dans [PPK06], D. Pumain distingue trois classes de modèles urbains suivant l'objectif poursuivi : les explicatifs, les opérationnels et les prédictifs, ces propriétés n'étant pas exclusives les unes des autres. Nous essayons d'affiner et d'illustrer cette catégorisation dans les paragraphes suivants. La simulation est un sujet actuel et important en épistémologie des sciences sociales [VP06, Liv06, Var10], que nous ne faisons qu'effleurer dans ce chapitre.

Simulation urbaine et jeux vidéos. Commençons par revenir sur les jeux vidéo de type *city builder* évoqués en tout début de chapitre. Quelles différences y-a-t-il entre les règles régissant l'IA de ces jeux et les règles intégrées aux modèles que nous avons présentés ? Ces jeux ne peuvent-ils pas être utilisés pour mener des simulations « sérieuses » sur la ville ?

Le principe d'un *city-builder* « à la SimCity » est de mettre le joueur aux manettes d'une ville virtuelle dont il est à la fois le maire et l'unique aménageur. Il construit et administre la ville comme bon lui semble : infrastructures de transports, résidences, commerces, industries, espaces verts, services publics, taxes, etc. Il peut voir en temps réel sa ville se développer en réponse à ses constructions et à ses décisions politiques et économiques. Sa politique est évaluée par de nombreux indicateurs socio-économiques qui l'informent de la satisfaction des habitants de sa ville. A l'origine ces jeux ne sont pas destinés à devenir une référence sur la façon dont une ville réelle « fonctionne » et se développe, même si leurs créateurs avouent s'inspirer de travaux d'urbanistes et de géographes pour concevoir l'IA de leurs jeux [Wik10b].

Si les premières versions de ces jeux autorisaient des interactions parfois aberrantes (le joueur pouvait par exemple aménager un secteur résidentiel à côté d'une centrale nucléaire sans répercussions sur sa future élection), les versions ultérieures se sont attachées à proposer un réalisme accru à la fois du visuel (bâtiments, 3D) et des dynamiques urbaines simulées, la progression dans la partie étant conditionnée à des codes de « bonne gestion ». Ces jeux ont intégré petit à petit un grand nombre de règles spatiales. Ils constituent indéniablement un bon outil de transmission, dont « chaque partie conduit le joueur à s'approprier une pensée et une pratique de l'espace, ainsi que quelques rudiments d'aménagement du territoire et d'urbanisme » [MR08]. Plusieurs retours d'expériences ont illustré leur potentiel pédagogique lors de séances avec des classes de collège et de lycée [Hoc, Car97].

Cependant, de tels jeux ont une ambition avant tout globalisante (simuler une ville aussi bien dans sa complexité géographique qu'urbanistique, économique que sociale). Ils ne présentent

pas de documentation explicite sur les hypothèses et mécanismes en jeu, ni d'outils analytiques d'évaluation comparative des scénarios. De ce fait ils se situent plus dans une logique de « modélisme » (maquettes réalistes en surface) que de modélisation au sens de plateforme ouverte, permettant un accès aux paramètres et à une expérimentation rigoureuse et reproductible pour répondre à des questions précises.

Différences entre modèles opérationnels et modèles explicatifs. Les modèles intégrant utilisations du sol et transports comme Urbansim [WBN⁺03], au même titre que CUF (*Californian Urban Futures*²⁴ [LZ98]), Transims (*Transportation analysis and simulation system*) ou Transus²⁵ [DLBPV84, JDLB00], sont des outils de simulation matures à portée opérationnelle et prédictive bien plus qu'explicative. D'autres plate-formes logicielles plus récentes utilisent les SMA, telle MATSIM²⁶ dont l'objectif est d'approcher finement le comportement des automobilistes sur le réseau autoroutier suisse, pour étudier l'impact de stratégies de limitation de vitesse sur leur encombrement, la pollution générée et les temps moyens de parcours. M. Batty souligne dans [Bat08] que peu de nouveautés conceptuelles ont vu le jour depuis les années 1980 dans ces modèles intégrés (*integrative modeling*) pour la planification et l'aménagement. Selon lui, l'arsenal de modèles de ce type était déjà au point dans les années 1990, et l'évolution depuis lors n'a été que dans le sens d'une incorporation de données plus fines, et de visualisations plus réalistes, tandis que les processus intégrés restaient inchangés. Nous ne rentrons pas ici plus dans le détail de la pratique modélisatrice dans ce domaine proche des transports. Il s'agit d'un champ de recherches à part entière, parallèle à celui dans lequel se situe notre travail, qui est celui des modèles urbains à vocation compréhensive et explicative de dynamiques long-terme. Ces deux champs ne sont pas pour autant étanches aux influences de l'autre. Les modèles intégrés et opérationnels sont nécessairement plus « massifs » en données. Ils ne cherchent pas des mécanismes parcimonieux s'inscrivant dans une théorie plus englobante, mais intègrent des descriptions très précises de dynamiques contemporaines mieux connues grâce aux données.

Modèles exploratoires. Cette classe regroupe les modèles fabriqués dans un esprit d'expérimentation de comportements théoriquement parcimonieux, en essayant d'injecter un minimum de connaissances pour pouvoir « garder le contrôle » sur le modèle et que celui reste intelligible et potentiellement exploratoire sur toutes ses dimensions de l'espace des paramètres (voire analytiquement).

Ces modèles sont souvent génériques, ils animent des entités dont le comportement peut suggérer celui d'une large palette d'entités urbaines existantes. Par exemple, Batty montre dans [Bat01] qu'un modèle simulant l'activité d'une colonie d'agents réactifs sur une grille régulière sur laquelle sont situées des ressources, est suffisant pour générer des structures hiérarchiques remarquablement stables dans le temps, à l'image de l'organisation hiérarchique des systèmes de villes. Les agents sont capables uniquement de percevoir une variation de ressource et se déplacent en suivant le gradient d'une ressource localisée dans l'environnement (algorithmes colonies de fourmis).

Les *generative social scientists*. On doit cette appellation à des sociologues comme Nigel Gilbert [GT05a] ou Joshua Epstein [EA96]. Leur devise est : « if you didn't grow it you didn't explain it ». Les objectifs de la simulation sont décrits :

²⁴<http://www.urbanfutures.org/index.cfm>

²⁵<http://www.modelistica.com/>

²⁶<http://www.matsim.org/>

« the aim is to provide initial microspecifications (initial agents, environment and rules) that are *sufficient to generate* the macrostructures of interest » [EA96].

« simulation needs to be a theory-guided entreprise and (...) results of simulation will often be the development of explanations, rather than the prediction of specific outcomes » [GT05a].

Cette école s'inscrit moins dans une démarche d'opérationnalisation du modèle pour en faire un outil d'aide à la décision que dans une démarche de test d'hypothèses explicatives. Un simulateur peut devenir un moyen de filtrer les bonnes des mauvaises explications sur une question de recherche particulière. En conclusion de [EA96], les auteurs comparent l'arrivée des modèles multi-agents chez les *social scientists* à l'arrivée du microscope chez les biologistes : qui ne voudrait pas apprendre à s'en servir pour y voir plus clair ?

Modèles opérationnels (i.e utilisables pour l'aménagement du territoire). Pour Batty, le degré de maturité d'un modèle se mesure en référence aux possibilités de l'appliquer dans un contexte réel d'aménagement [Bat08]. Les modèles sont construits à destination des politiques, et un certain nombre de néologismes ont été introduits pour étiqueter cette pratique de la simulation, comme *artificial planning experience* pour J. Portugali et I. Benenson [PB95]. En géographie, ces travaux se regroupent derrière l'étiquette de « geosimulation » (notamment l'équipe de M. Batty au laboratoire CASA de Londres, ou de P. Torrens à l'Arizona State University) et n'hésitent pas à parler de révolution épistémologique, du fait de modèles partant des micro-motivations individuelles pour fonder la genèse de macrostructures géographiques.

Modèles orientés vers la gestion des ressources naturelles ou la résolution de conflits dans des sociétés agraires. Cette école nous semble regrouper les modèles construits dans des instituts de recherches comme le CIRAD, le CEMAGREF ou l'INRA. Cette école a largement contribué au développement de la simulation participative, où le but est d'affiner les comportements des agents du modèle (qui représentent des acteurs de terrain) en faisant jouer les acteurs pour « capturer » leur expertise et leur stratégies de prise de décision. Les simulations sont des jeux qui doivent les mettre dans des situations simulant les conditions d'exercice de leur métier (et les conflits d'intérêt qui peuvent survenir). On peut citer les travaux de F. Bousquet, C. Le Page, A. Bah [DLPBB03]. La thèse de G. Abrami [Abr04] offre un exemple intéressant de la mise à profit d'un meta-modèle d'organisation multi-agent (AGR [GF98]) pour modéliser un problème complexe de gestion environnementale).

Modèles statistiques. Ils intègrent des agents « idéal-type » issus de catégorisations statistiques préalables. On peut citer le cas original d'une « filière colombienne », avec une lignée de travaux sur les mobilités résidentielles à Bogotá, de C. Weber et D. Badariotti [BW02], la branche modélisation statistique-informatique de l'IRD (F. Dureau [Dur99], M. Piron, A. Drogoul et J. Gil-Quijano [GQPD07a, GQ07], D. Vanbergue [Van03]). SIMULBOGOTA que nous présentons dans le chapitre 6 est un aboutissement remarquable de cette famille de modélisations.

Modèles explicatifs de long-terme guidés par les données historiques. Cette classe regroupe les modèles conçus pour tester des hypothèses de dynamique territoriale évolutive sur le long-terme, et constitués avec des agents qui sont des entités spatiales, comme *Simpop*. Cette dernière école est intermédiaire par rapport aux précédentes : un peu plus riche en contenu géographique que les modèles plus minimalistes (utilisation de catégories statistiques, *data driven*, etc.) et originale à deux points de vue : elle s'attaque à une échelle *ville-système de villes* peu fréquentée par les autres écoles, et elle représente par des agents des entités immobiles.

Modèles normatifs. La conception collaborative permet d’expliciter le savoir des participants et de confronter différents points de vue en les exprimant dans un langage formel non ambigu. Si le résultat fait consensus, le modèle peut ensuite être utilisé à la fois comme référence en cas de conflit, mais aussi comme une brique avec laquelle on peut construire d’autres modèles. Les modèles du GIEC (Groupement International d’Experts sur le Climat), qui regroupe plus de 200 chercheurs, sont un bon exemple de modèles possédant cette propriété.

Modèles pédagogiques. Destinés à la communication et à l’enseignement, ils ne sont pas construits dans un objectif de recherche, le fonctionnement du système modélisé étant bien compris. Ces modèles illustrent souvent des cas moyens et théoriques plutôt que des situations géographiques réelles. *Accessim*, présenté dans la section suivante, possède cette propriété.

Modèles de la *geocomputation*. Ils poursuivent des objectifs différents des travaux de micro-simulation et de ceux de la communauté des modèles à base d’agents. Développés principalement par les écoles de Leeds et de Bristol, ils sont construits à partir d’agents représentatifs, d’individus moyens, à partir de catégories, et sans avoir d’informations à l’échelle individuelle. Cette approche mobilise des statistiques à des échelles locales très fines pour fabriquer des populations synthétiques. L’orientation de ces études de géocomputation va très rarement dans le sens de la compréhension, mais plutôt pour de l’estimation localisée fine, et donc de la prévision.

5 Une illustration des dimensions de l’apport d’un simulateur à base d’agents : *Accessim*²⁷

Accessim est un modèle à base d’agents initialement pensé et développé pour être un outil pédagogique illustrant des concepts géographiques clés à travers un jeu de simulation. A partir de la simulation de déplacements quotidiens d’enfants dans la ville, qui visitent à la sortie de l’école les boulangeries du quartier à la recherche de pains au chocolat, il permet d’aborder des questions relatives à l’accessibilité, aux services et à leurs dessertes, et à l’(in)égalité spatiale :

- Qu’est ce que l’accessibilité ?
- A quoi correspondent les notions de centralité et d’inégalités territoriales ?
- Comment illustrer les notions d’auto-organisation et d’auto-adaptation dans un contexte urbain ?

Le modèle a été conçu pour être simple et pour pouvoir être abordé comme un jeu. Dans ce petit « laboratoire urbain », le joueur tient successivement plusieurs rôles et il est sensibilisé aux notions spatiales et à la variété de points de vue (habitant, commerçant, aménageur) qui peuvent exister sur les questions mentionnées.

Intérêt pédagogique de simulations informatiques. Des expériences antérieures en géographie ont déjà montré l’intérêt du jeu pour sensibiliser le jeune public aux problématiques spatiales. Parmi d’autres, Claude Mercier a proposé en 1990 « le jeu du boulanger » pour aider à l’apprentissage de la théorie des lieux centraux [Mer90, Aud95]. Les notions-clés en jeu étaient la hiérarchie entre lieux de peuplement et le rôle de la distance. Les jeux avaient une solution et les enfants étaient conduits vers cette solution.

²⁷Note : des extraits de cette section sont issues des articles [DLNL08, DLNL⁺09]. La reproduction de ces passages est faite avec l’accord des co-auteurs.

Du côté de la simulation à base d'agents, son utilisation à des fins pédagogiques, aujourd'hui mise en avant [Rig06], n'est pas nouvelle elle non plus. *Starlogo* et *Netlogo*, des outils aujourd'hui largement utilisés en simulation [RLJ06], furent à l'origine développés à des fins pédagogiques [Res94]. A la fin des années 1960 au MIT, un groupe mené par Seymour Papert réfléchit à des approches constructives de l'enseignement la géométrie aux enfants [Pap81]. Ils créent la tortue Logo et son langage associé. Le résultat est un petit robot répondant à des commandes simples que l'enfant peut facilement mémoriser. La tortue, dispositif physique au départ, est par la suite virtualisée et le programme est utilisé dans les classes de primaire et de collège dans de nombreux pays. Au début des années 1990, Resnick et ses collègues développent *Starlogo*, une version « multi-tortues » du langage Logo. Cette fois, l'expérimentateur peut donner des ordres qui sont exécutés simultanément et à l'identique par plusieurs tortues. Cette version parallèle du Logo ouvre de nouvelles perspectives : elle permet la création de « micro-mondes » où de nombreuses entités ou agents autonomes, embarquant toutes le même programme, interagissent dans un environnement commun. Dès ses débuts, *Starlogo* est utilisé comme son prédécesseur à des fins pédagogiques. En élaborant lui-même de petits programmes-jouets où le contrôle est distribué, et dans lesquels la « solution » émerge des nombreuses interactions entre les entités, l'enfant se sensibilise à la nature décentralisée de phénomènes collectifs, naturels comme sociaux : flocks d'oiseaux, embouteillages, colonies de fourmis, bancs de poissons, etc. Cette approche permet de dépasser ce que Resnick appelle *the centralized mindset* [Res96], la propension à favoriser une explication centralisée d'un phénomène dès lors qu'il présente une certaine unité organisationnelle à l'observateur extérieur (présence d'un leader dans le groupe pour maintenir l'organisation, présence d'obstacle ou d'accident pour expliquer l'embouteillage, etc.). Les séances d'expérimentation avec des élèves de collège sont relatées dans [Res94].

Objectifs d'Accessim Accessim est un programme *Netlogo* et cherche à illustrer simultanément une question géographique et les outils scientifiques actuels mis en œuvre pour la comprendre. Il est centré sur l'accessibilité en milieu urbain, et sur les déplacements motivés et réguliers : les déplacements quotidiens de résidents liés à des services²⁸. La formalisation choisie intègre simultanément deux points de vue sur ce concept d'accessibilité :

1. celui des résidents qui doivent accéder à des services ; ce point de vue rejoint des problématiques d'*aménagement du territoire* ;
2. celui des services, dont la fréquentation dépend de leur accessibilité et de leur potentiel d'utilisateurs ; ce point de vue rejoint des questions de *géomarketing*.

Avec le temps, les mobilités des résidents, combinées avec les mobilités induites par les services, révèlent des constructions territoriales diverses. Fondées sur l'interaction spatiale, elles rendent compte de l'intensité avec laquelle les espaces sont connectés par les individus. Nous postulons que c'est l'interaction spatiale qui produit les différenciations spatiales, qui viennent s'ajouter à l'inégale répartition des ressources [Ull80, Häg67, Häg87]. Accessim s'inscrit dans ce cadre théorique général, mais cherche à être expressif auprès d'un public d'enfants : les résidents sont des enfants, et les services sont des boulangeries. Mais le modèle peut aussi être utilisé avec des commerces plus spécialisés, ou bien d'autres types de services (à la personne, hôpital, banque).

Principes de la dynamique. La dynamique est formalisée au niveau le plus élémentaire de prises de décision, les *individus* et les *services*, mais les mécanismes intègrent également les

²⁸Nous prenons ici une définition large de service recouvrant un vaste champ d'activités qui comprend l'administration, les transports, les activités financières et immobilières, les services aux entreprises et aux particuliers, l'éducation, la santé et l'action sociale et aussi les commerces.

niveaux géographiques supérieurs, celui du *quartier* celui de la *ville*. Ils définissent des contextes spatiaux (environnements) produits par les individus, et qui influent en retour sur ceux-ci (cf. figure 2.11). Ici l'objectif des déplacements individuels est un service de proximité, la boulangerie. Ces déplacements sont supposés nécessaires et réguliers. Un individu est localisé dans un quartier avec lequel, il va interagir. C'est au niveau du quartier qu'est accumulée une connaissance collective de pratiques, commune à tous les habitants de ce quartier. C'est à ce niveau que les informations sur l'emplacement et la qualité des services circulent. Enfin, au niveau ville est associé un réseau de rues (prédéfini et paramétrable), les nœuds étant le support des déplacements et de l'accessibilité.

Les individus ont un budget-temps fixe pour accéder à un service. Il y a deux types d'individus :

1. les *suiveurs* : ils ont un comportement mimétique et suivent les itinéraires « du plus grand nombre » ;
2. les *explorateurs* : ils explorent leur propre itinéraire, aléatoire à chaque nouvelle sortie.

Chaque enfant, dans le temps de sortie qui lui est imparti (on suppose par ses parents), cherche à trouver une boulangerie. Parallèlement, le fonctionnement de ces boulangeries repose sur des logiques de rentabilité : la fréquentation du service doit recouvrir les coûts de fonctionnement sous peine de disparaître. Les coûts associés aux déplacements des individus et aux performances des services sont évalués au cours de la simulation. Ils traduisent respectivement une satisfaction de la population et une satisfaction des services.

Réification de niveaux d'organisation multiples. Plusieurs mécanismes mettent en jeu des interactions entre entités de même niveau d'organisation, mais aussi entre des entités de niveaux d'organisation différents. Les mécanismes peuvent s'appuyer sur des interactions volontaires et directes, explicitement programmées, comme la consommation (individu et service) ou la transmission et le partage de l'information (individu et quartier) ; ou encore des interactions indirectes (ou émergentes) résultant de multiples autres interactions comme la concurrence (interaction service-service) et la congestion (individu-individu-réseau). La dynamique du modèle repose sur la combinaison de l'ensemble de ces interactions (cf. figure 2.11). Le fonctionnement du modèle est résumé par la figure 2.12, qui lie les déplacements des individus et leurs conséquences sur les services et la connaissance accumulée au niveau des quartiers.

5.1 Eléments multi-agents d'Accessim.

Types d'agents. Plusieurs types d'agents coexistent au sein de ce « micro-monde ». Les agents-individus sont localisés dans les agents-quartiers selon une configuration de densités qui est définie par la situation initiale. De même le territoire est desservi par un réseau viaire. Le réseau est initialisé au début de la simulation. Enfin, les services sont initialisés au début de la simulation, mais leur distribution spatiale peut être transformée à tout moment au cours de la simulation.

Les agents ont volontairement été conçus avec le minimum de capacités permettant de faire émerger des satisfactions différenciées ; ils n'intègrent pas véritablement de comportements cognitifs. En particulier ils ne sont pas capables de communiquer entre eux. Les individus n'ont pas conscience de leur niveau d'« autonomie » par rapport au temps de déplacement qui leur est imparti, et ils possèdent une représentation très limitée de leur environnement et des autres agents. Leurs seules capacités sont la possibilité de se déplacer, de mémoriser un chemin par lequel ils sont passés et de subvenir dans les bonnes proportions à leur appétit en achetant le bon nombre de pains au chocolat. Le comportement des deux types d'individus (explorateurs et suiveurs) n'est que *réactif*. De la même façon, les services ont un comportement réactif : leur

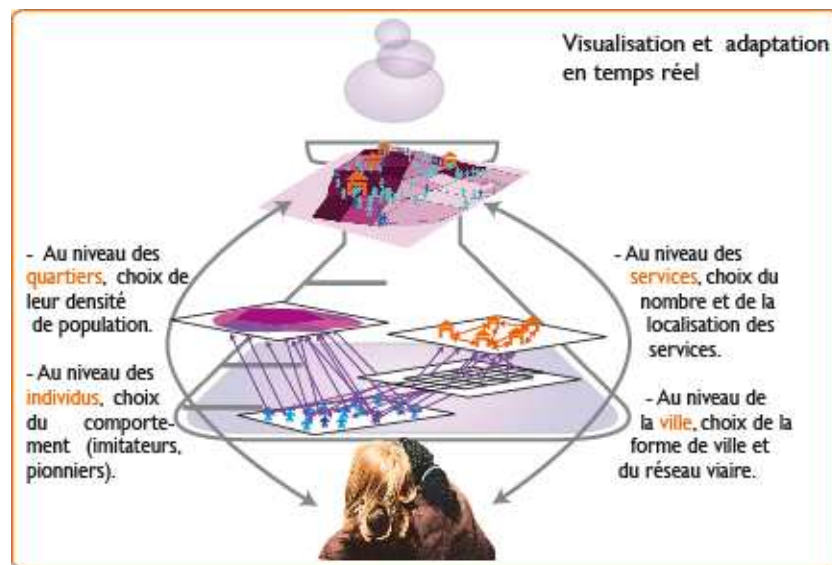


FIG. 2.11 – Un petit laboratoire urbain pour expérimenter sur l’accessibilité et les interactions entre les niveaux de décision dans la ville.

production est guidée par la demande et ils renouvellent leur stock dès qu’il passe sous une valeur seuil, paramétrée. Ils ont leur propre temporalité, également paramétrable, et leur rentabilité est évaluée au terme de cette période.

Le réseau sur lequel évoluent les agents est un graphe, dont les arêtes correspondent à des rues et les nœuds à des intersections. Les arêtes du graphe sont valuées, ce qui se traduit par des vitesses de déplacement autorisées qui varient suivant les axes du réseau. Cela autorise la prise en compte de réseaux à plusieurs échelles (routes, autoroutes), bien que cela ne figure pas parmi les objectifs des premières séances d’expérimentation.

Tableaux noirs et connaissance partagée. C’est au sein des agents-quartiers qu’est gérée la mémoire des chemins conduisant aux services fréquentés par les individus résidant dans le quartier. Le quartier encapsule une connaissance locale de la localisation des services, de l’intensité de leur fréquentation par les résidents du quartier, et une note moyenne de satisfaction associée à chacun des services connus (fonction de la satisfaction des requêtes des individus aux services). Ils jouent le rôle de « ce qui se transmet de proche en proche entre les habitants d’un même quartier, au sens entité géographique ». Le choix a été fait de modéliser cette connaissance collective par un agent, qui centralise les expériences des individus, les trie, et restitue une synthèse des différentes pratiques individuelles expérimentées. On peut donc considérer que les quartiers constituent les agents cognitifs du modèle. Cette accumulation est dynamique. Le rang d’un itinéraire, dans la hiérarchie des itinéraires, dépend de son temps de parcours. Ce temps de parcours peut évoluer en fonction de la fréquentation des axes de transports, par les agents individus d’autres quartiers (phénomène de congestion). Une littérature abondante sur les problèmes d’affectation (choix d’une destination pour chaque origine, pour un motif donné) et de choix d’itinéraire (plus court chemin) est citée par [The02] et [Pio06], dans l’optique de la modélisation de déplacements pédestres. Avec le choix que nous avons fait d’une approche à un niveau méso, on résout partiellement la complexité de ces phénomènes de circulation urbaine.

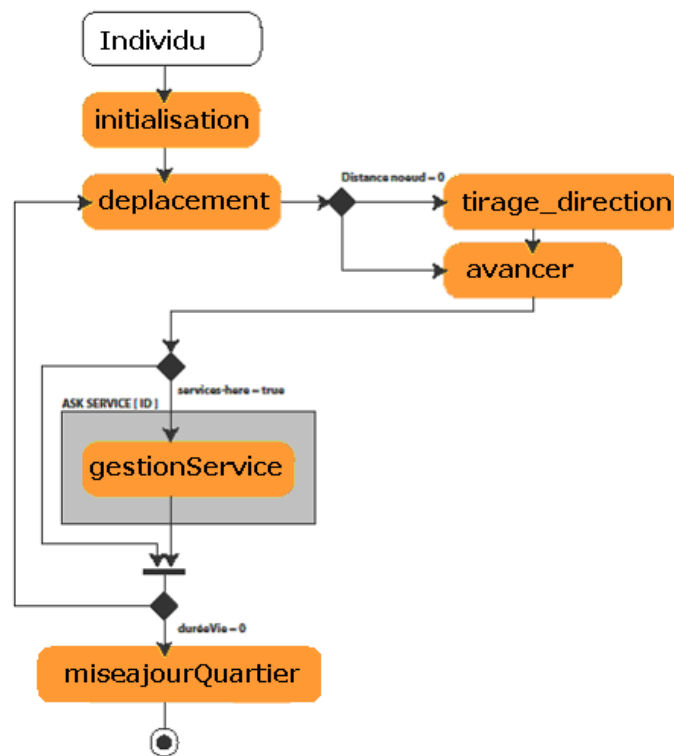


FIG. 2.12 – Diagramme d’activité d’une itération dans *Accessim*. A chaque itération, tous les individus se déplacent : soit vers le réseau soit, s’ils y sont déjà, vers leur prochaine destination à la vitesse permise par la voie. Lorsqu’un service se trouve sur leur chemin, ils cherchent à consommer un bien. S’ils obtiennent satisfaction, ou si le temps qui leur était imparti est écoulé, les individus retournent dans leur quartier, où ils pourront partager l’information associée à leur déplacement.

Collaboration réactive. Cette communication entre individus par l’intermédiaire d’une structure de données tierce (inspirée des *tableaux noirs* des premiers âges de l’intelligence artificielle distribuée) permet à la population du quartier de résoudre un problème (optimiser leur satisfaction) de façon distribuée sans présupposer ni une organisation globale, ni une communication directe entre individus, mais seulement les capacités d’ordonner les temps de trajet associés à deux itinéraires, et de lire et écrire une structure de données partagée qui fait office de tampon. De façon itérative, le chemin mémorisé au niveau d’un quartier est amélioré par les parcours successifs et au bout d’un nombre d’itérations suffisamment grand, un chemin optimal est connu au niveau du quartier, qui est donc emprunté par les individus-suiveurs. Du point de vue de l’observateur extérieur, les agents ont résolu un problème de recherche de plus court chemin dans un graphe sans établir de stratégie de recherche concertée et planifiée. Cette collaboration indirecte et via l’environnement est inspirée de celle observée chez les insectes sociaux [Dro93]. Il est intéressant de noter que tout en refusant de faire communiquer nos agents lorsqu’ils se rencontrent, nous faisons les hypothèses sociales très fortes :

1. la connaissance accumulée au niveau du quartier est objective (ce sont bien les chemins les plus efficaces qui sont retenus) et robuste (elle ne se détériore pas dans le temps) ;
2. les individus se fient entièrement aux connaissances de leurs voisins ;
3. tous les individus sont tous en mesure de mettre à jour cette connaissance partagée, ils le font uniquement quand cela est utile au collectif, et alors ils le font systématiquement.

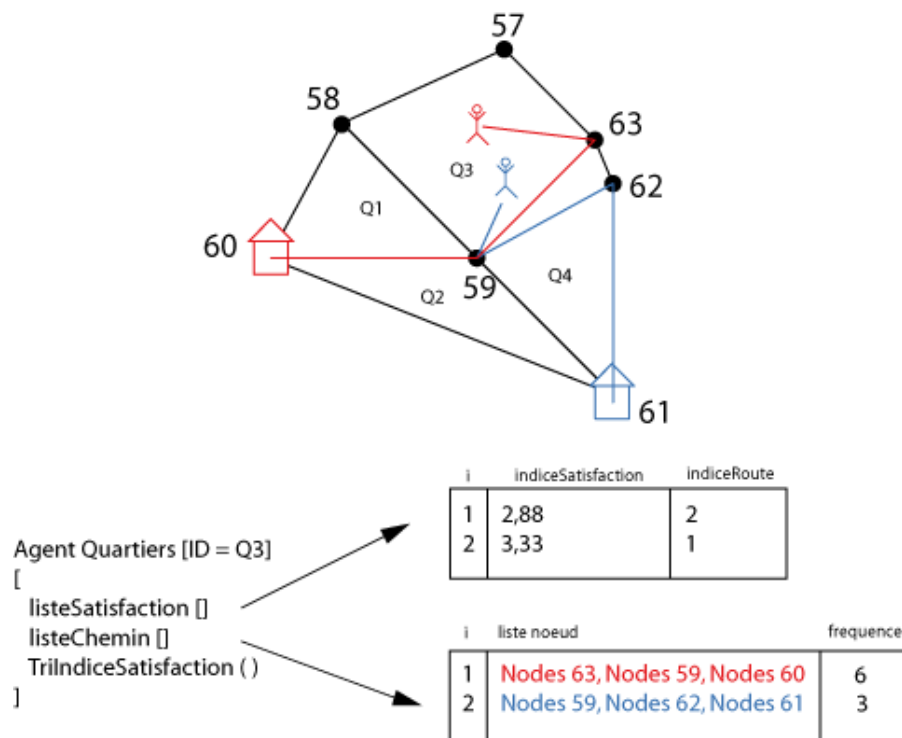


FIG. 2.13 – Représentation schématique de l'évolution des mobilités individuelles en fonction de la connaissance collectivement accumulée. Les individus du quartier 3 ont le choix entre le service 60, plus proche, et le service 61, mieux connu (car plus fréquenté). Le choix de l'une de ces deux destinations par les individus est le résultat d'une combinaison entre un critère exogène et un tirage aléatoire. Dans cet exemple, le service 61 sera un peu plus souvent choisi que le 60, car il est plus proche. Du fait de la différence de fréquentation, le service 60 sera encore visité plusieurs fois, jusqu'à ce que le service 61 devienne la destination favorite des habitants de ce quartier.

Apprentissage individu-centré par renforcement. Une approche concurrente, plus individu-centrée et individualiste dans ses hypothèses, consisterait à programmer les individus pour qu'ils « apprennent » leur environnement non pas collectivement mais seuls, par exemple en mémorisant un nombre restreint des itinéraires successifs qu'ils ont emprunté, en récompensant ceux qui leur ont été bénéfiques (i.e ceux les ayant menés à un service en un temps raisonnable) et au contraire en pénalisant ceux qui se sont révélés infructueux. On serait alors dans le cas d'un apprentissage par renforcement où chaque agent développerait de façon autonome sa propre carte mentale, sans partager d'information avec les autres individus du quartier. Une représentation plus réaliste de la façon dont l'information circule dans un quartier se trouve probablement quelque part entre ces deux hypothèses extrêmes (la communication parfaite dans le cas de l'apprentissage collectif; l'individualisme total et sans interactions dans le cas de l'apprentissage par renforcement).

5.2 Expérimentations

Situations initiales. Définir une situation initiale revient à définir la configuration spatiale initiale de la ville à travers trois composantes :

1. la répartition de la population dans les quartiers ;
2. la forme du réseau viaire (cf. figure 2.14) ;
3. les localisations des services.

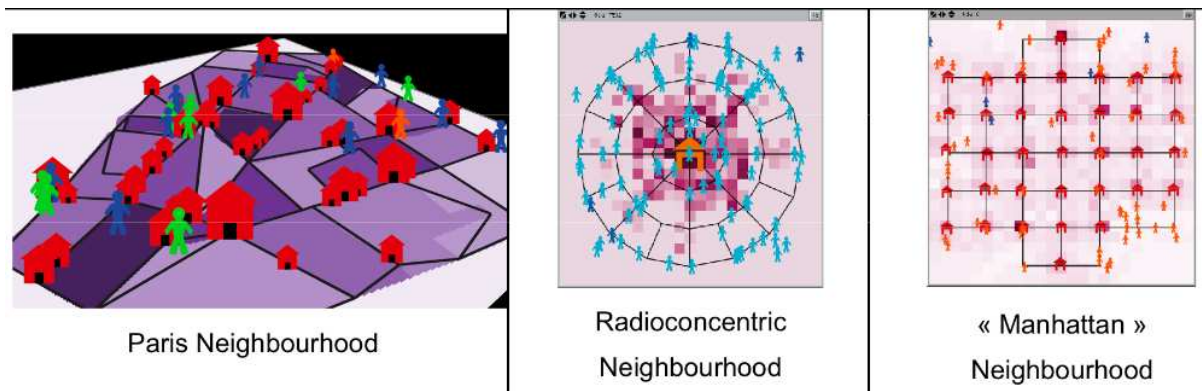


FIG. 2.14 – Différents types de réseaux viaires utilisables dans *Accessim* : réel (à gauche, importation vectorielle du réseau des principales artères du 12^{ème} arrondissement parisien) ou théoriques (au centre et à droite, radioconcentrique et en grille).

Concernant le dernier point, la localisation peut se faire à l'initialisation, mais les services peuvent aussi être ouverts et/ou fermés au cours de la simulation. On observe alors comment le système s'adapte.

5.2.1 Expérimentations à visée pédagogique

Consignes et situation de jeu. Le joueur ne reçoit pas forcément de consignes au départ. Seules quelques informations concernant le comportement de chaque type d'agent (enfants et boulangeries) lui sont transmises ainsi que les contraintes associées à chacun, comme le temps de sortie des enfants (cf. figure 2.15). Les expériences nous ont montré que l'environnement visuel et interactif de *Netlogo* suffit ensuite à l'appropriation du modèle. Les outils à sa disposition lui sont aussi présentés, pour intervenir sur la configuration ou pour analyser la situation.

Le joueur voit comment les agents-enfants s'adaptent à leur environnement et comment la taille et l'attractivité des services varient. Les conséquences de ses choix sont évaluées à plusieurs niveaux géographiques : taux de satisfaction des agents-enfants à l'échelle des quartiers, moyenne des distances parcourues par les agents-enfants à l'échelle de la ville et enfin les ventes totales des boulangeries à l'échelle de la ville modélisée. La carte montre en temps réel la satisfaction des agents-enfants, de même que celle des services qui se mesure à la taille du pictogramme les représentant. L'intensité de la couleur du quartier restitue en temps réel la part des agents-enfants qui ont pu accéder à une boulangerie : c'est « la carte du bonheur ».

Ce jeu a été proposé à des groupes d'enfants à plusieurs reprises (Festival International de Géographie de Saint-Dié les Vosges, Fête de la Science). Au cours de ces deux manifestations, le dispositif a été observé lors de son test en profondeur par une trentaine d'enfants entre 8 et 12 ans. Pour encadrer l'apprentissage, deux rôles étaient proposés :

1. Comme dans un *city builder*, le joueur est le *maire* de la ville, il a autorité sur le placement de toutes les boulangeries. Il dispose de trois indicateurs pour évaluer en temps réel son aménagement :
 - (a) le taux de satisfaction de la population des enfants ;



FIG. 2.15 – Séance de jeu avec des enfants de CM1 lors du salon de géomatique du festival de géographie de Saint-Diés des Vosges en 2008.

- (b) la distance moyenne parcourue par ces enfants ;
 - (c) la richesse totale accumulée par les boulangeries (plus la ville est riche, plus les rentrées sont importantes et plus elle est attractive).
2. Le joueur se retrouve face à une ville déjà composée (densités, réseau, semis de boulangeries) et qui peut avoir déjà « vécu » (les boulangeries sont alors déjà différenciées en taille). Le joueur est un *boulangier* et cherche la meilleure implantation possible pour son commerce. Une fois qu'il a positionné sa boulangerie, il visualise son développement en le comparant à celui des autres boulangeries présentes.

Dans les deux cas, les outils d'évaluation à disposition, couplés avec la carte, lui permettent de passer d'évaluations locales à des évaluations plus globales de l'organisation, et de se familiariser avec la notion d'*évaluation multicritères*. Invité à considérer ces différents indicateurs, il s'aperçoit que tous les critères retenus ne sont pas forcément améliorables simultanément.

Lors du déroulement du jeu, le joueur-enfant était accompagné dans ses choix. On lui demandait par exemple, lorsqu'il tient le premier rôle, ce qu'il pensait de la situation suivante : les quartiers n'ayant pas les mêmes densités de population, faut-il mieux placer les services dans les quartiers le plus densément peuplés, pour contenter un maximum d'habitants, ou bien de façon équilibrée « entre » les quartiers, par souci d'équité ? Le passage du premier au second rôle se faisait sans rupture (sans réinitialisation du modèle) : après avoir constitué son propre semis de boulangeries en tant qu'aménageur, le joueur devait appréhender sa ville avec un autre regard. Il pouvait soit placer sa boulangerie près des autres boulangeries pour capter une partie de leur clientèle, soit la placer dans les espaces laissés vides pour profiter d'une clientèle non satisfaite.

Retours d'expériences. Ces séances nous ont permis de dégager, qualitativement, deux types de comportements observés de façon récurrente chez les joueurs-enfants :

1. ceux qui se situent d'emblée dans la perspective du résultat final et cherchent à répartir au mieux l'ensemble des boulangeries par rapport à un critère choisi. Ils procèdent par une

succession d'essais et d'erreurs, et c'est la propriété d'adaptation du système qui leur sert le plus (*Math professor's son strategy*).

2. ceux qui ont besoin de règles, d'encadrement et qui procèdent pas à pas. Pour ceux ceux-là, l'absence de consignes est un handicap : ils sont perdus devant le champ des possibles qui s'offrent à eux. Ils se reconstruisent des règles pour pouvoir explorer et comprendre le système (*Blind red fish strategy*).

Dans les deux cas, il nous est apparu une très bonne compréhension de ce qui était proposé et en particulier du fait que le modèle ne cherche pas à mimer la réalité dans tous ses détails, mais est une simplification qui aide à mieux la comprendre. On retrouve la force expressive et anthropomorphique des approches entité-centrées et multi-agents.

5.2.2 Expérimentations à visée exploratoire

Nous avons parallèlement conduit des analyses de sensibilité, en particulier à la disposition initiale des services. Nous proposons un court résumé de l'une de ces expériences [DLNL08].

Deux services sont implantés dans la ville (où la répartition de la densité de population parmi les quartiers est uniforme) : l'un au centre, et l'autre sur la deuxième couronne de la ville fictive (cf. figure 2.16). Lorsque le service central est ouvert après le service périphérique, il ne peut capter la même clientèle que dans le cas d'une ouverture simultanée des deux services, les quartiers gardant la mémoire du service voisin, déjà visité.

Le rapport des tailles atteintes par les deux services lorsque le système se stabilise est comparé au rapport des valeurs d'un indice d'accessibilité (ici l'indice de Shimbel²⁹) des deux quartiers dans lesquels ils sont implantés. Le ratio des accessibilités des quartiers donne un avantage de la position centrale de 22% sur la position excentrée. De façon cohérente, la clientèle du service central est plus importante lors d'une ouverture simultanée des deux services (différence de l'ordre de 26%). Cependant, du fait du mécanisme d'apprentissage évoqué précédemment, le service excentré parvient à faire jeu égal (différence de tailles négligeables) avec le service central, dans le cas où, ouvrant en avance, il a le temps de fidéliser une clientèle dans un contexte sans concurrence (cf. figure 2.16). On peut néanmoins s'attendre à ce qu'au bout d'un temps un peu plus long, le service central reprenne son avantage au fur et à mesure de l'exploration du territoire effectuée par les quartiers.

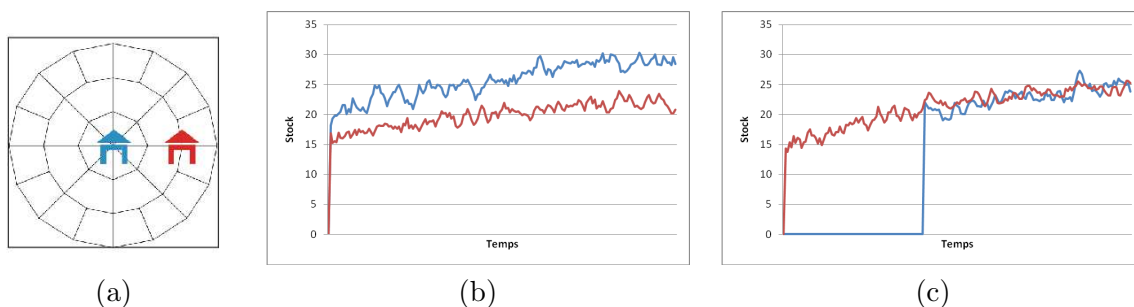


FIG. 2.16 – Localisations des services dans l'expérience (a) et évolutions comparées de leurs stocks dans le cas d'ouvertures simultanées (b) et décalées (c). Dans le premier cas le service le moins central souffre de sa plus faible accessibilité. Dans le second cas, il fait jeu égal car il a su fidéliser une clientèle (qui privilégie les services connus donnant satisfaction).

Ce résultat montre l'importance de l'interactivité de la simulation : non seulement les positions choisies par le joueur comptent, mais l'enchaînement des choix effectués influe directement

²⁹Nous revenons au chapitre 5 section 4.1 sur cet indicateur, le détail de son calcul est ici sans importance.

sur l'économie de la ville. Ces résultats renforcent le choix pédagogique d'une simulation informatique à la place d'un jeu de plateau par exemple, celle-ci offrant une gamme plus étendue à la fois de stratégies envisageables et de comportements stylisés.

Accessim est librement téléchargeable au lien suivant :
<http://www.spatial-modelling.info/ACCESSIM-French-version>

Chapitre 3

Formes et morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis

1	Des formes urbaines	68
1.1	Trois niveaux d'organisation du fait urbain	68
1.2	Des indicateurs et des classifications	69
1.3	Des propriétés émergentes à chaque niveau	70
2	Formes urbaines en Europe et aux Etats-Unis : constats	71
2.1	Formes de leurs systèmes de villes	72
2.2	Formes de leurs villes	74
3	Morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis : hypothèses	78
3.1	Hypothèses pour les systèmes de villes	79
3.2	Hypothèses pour les villes	80
3.3	Vers une mécanisation des hypothèses génératives des formes urbaines .	83
4	Questions abordées par simulation	89
5	Méthodologie	90
5.1	Les données	91
5.2	Quelles simulations ?	92

Dans le chapitre précédent, nous avons dressé un portrait rapide de l'histoire des modélisations mathématiques et informatiques des villes, afin de pouvoir ancrer notre contribution dans le paysage.

Dans ce chapitre, nous rentrons dans le détail des questions géographiques ayant motivé ce travail de recherche. Encore une fois, pour que le lecteur non géographe puisse aborder les modélisations des chapitres suivants avec toutes les clés nécessaires à leur évaluation, nous sortons du cadre informatique pour faire quelques rappels généraux sur l'organisation des systèmes urbains (section 1), ainsi que sur l'histoire de leur développement et leurs propriétés caractéristiques en Europe et aux Etats-Unis (section 2). Nous enchaînons en listant certaines hypothèses issues de la littérature pour expliquer la morphogenèse urbaine en général, et ses modalités spécifiques en Europe et aux Etats-Unis (section 3).

Enfin, nous présentons en détail nos objectifs (section 4). Ceux-ci peuvent se synthétiser ainsi : parmi les hypothèses géographiques formulées sur les processus de morphogenèses urbaines, génériques comme spécifiques, peut-on donner une traduction computationnelle de ces processus et les intégrer dans un modèle de simulation qui permette de faire le tri parmi ces hypothèses candidates à l'explication, et éventuellement d'en isoler un sous-ensemble, pour les valider ?

Notre objectif est d'apporter l'éclairage de la simulation informatique sur ces hypothèses, et de développer des outils adaptés à ces questions. Ces objectifs et les contraintes associées posent des problèmes méthodologiques importants. Ceux-ci tiennent à la fois aux données nécessaires, à leur sélection, à leur composition et à leur utilisation dans le modèle, mais aussi bien sûr au « style » de simulations à mettre en oeuvre, aux techniques à mobiliser pour implémenter à la fois des modèles utiles et des outils les exploitant. Ces enjeux informatiques et méthodologiques sont détaillés dans la dernière section (section 5).

1 Des formes urbaines

« Il est assez facile de se représenter une ville comme le résultat de multiples interactions, entre des acteurs (collectivités territoriales, entreprises, groupes sociaux, habitants), leurs artefacts matériels ou symboliques (logements, équipements, institutions, représentations), et des événements ou des épisodes marqués par certaines interventions politiques, des conjonctures économiques, des innovations techniques (...) Mais, à un autre niveau d'organisation, apparaissent des propriétés émergentes, issues des différentes formes d'échanges et d'interaction qui se produisent entre les villes, à plus ou moins longue distance. Ces propriétés sont caractéristiques de l'organisation des villes en réseaux, en systèmes, à un niveau macro-géographique, à l'échelle d'une grande région, d'un Etat ou d'un continent, voire du Monde. » (Denise Pumain, chapitre 13 « Systèmes de villes et niveaux d'organisation » (p. 238) dans *Morphogenèse*, P.Bourguin et A.Lesne (eds.), Belin [Pum06b])

1.1 Trois niveaux d'organisation du fait urbain

Quand il s'agit de se représenter et conceptualiser les systèmes urbains à un niveau suffisamment simplifié pour pouvoir en tirer des propriétés universelles, des lois, de nombreux auteurs s'accordent, dans cette démarche de représentation systémique, à identifier trois niveaux principaux d'organisation spatiale. Ils sont classiquement désignés *micro*, *méso* et *macro* ((cf. figure 3.1) :

- le niveau *micro* est celui des individus, des ménages, des acteurs intra-urbains (promoteurs, services, maire, etc.) ;
- le niveau *meso* est celui de la ville ;
- le niveau *macro* est celui du système des villes.

Ces termes *micro*, *meso* et *macro* ne sont pas accrochés à des niveaux dans l'absolu, l'emploi de l'un est toujours dépendant du sens donné aux deux autres, mais cet étiquetage est classique en modélisation des villes, s'y accordent par exemple D. Pumain [Pum06b] et L. Sanders [San07]. C'est cette association que nous garderons dans la suite de ce manuscrit.

De plus ces trois niveaux ne sont pas des catégories fixes et fermées, nous pouvons reconnaître un continuum entre ces niveaux, le long d'une échelle spatiale qui va de l'individu isolé à l'ensemble de la surface terrestre. D'autres niveaux de décision et d'action intermédiaires à ces

trois là sont par exemple celui des collectivités territoriales et de leur gouvernance, celui des groupes sociaux, celui des ensembles constitués par des villes aux profils fonctionnels identiques (technopoles européennes, villes portuaires), etc. Ces trois niveaux d'organisation principaux du fait urbain évoluent à des temporalités très différentes. Ils sont décrits par des variables et sont caractérisés par des propriétés émergentes qui leur sont propres.

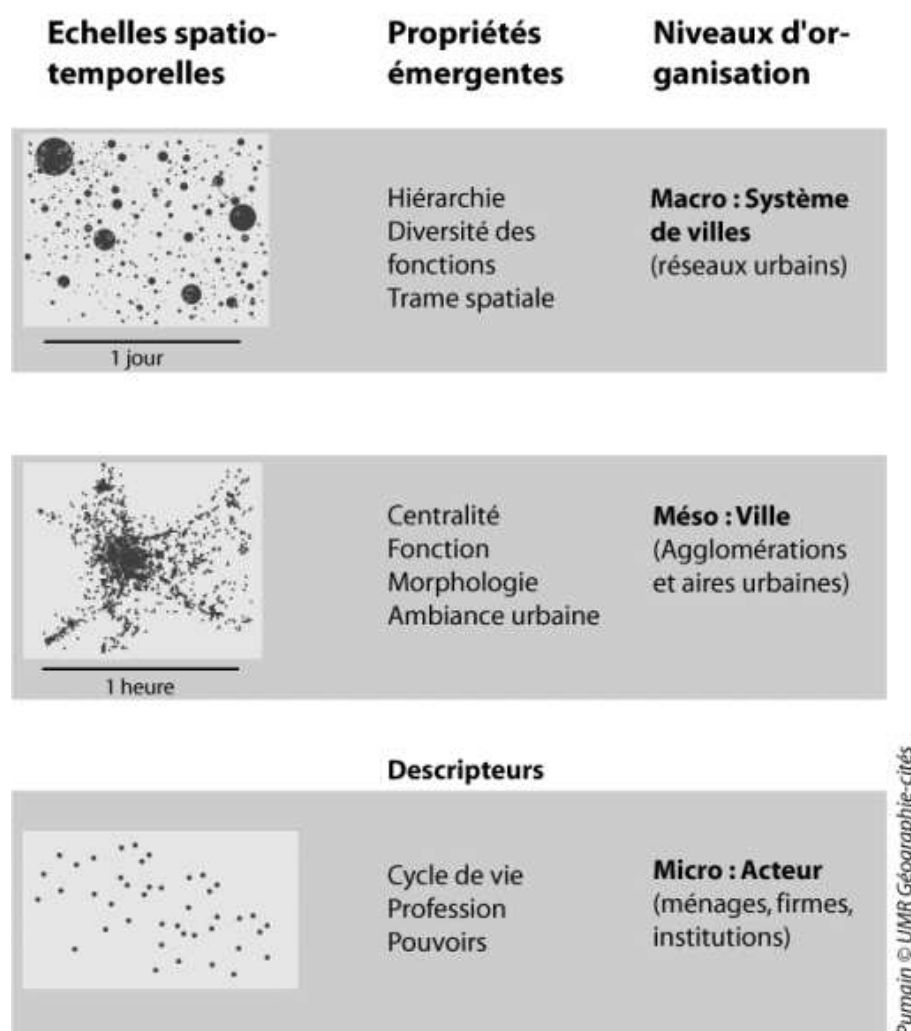


FIG. 3.1 – Trois niveaux d'organisation du fait urbain et les échelles spatio-temporelles et propriétés émergentes associées (extrait de [Pum06b]).

1.2 Des indicateurs et des classifications

Le choix des indicateurs pour décrire les objets urbains dépend de la question étudiée. Dans un courant donné de géographie, pour une même famille de questionnements, les mêmes indicateurs sont utilisés. Par exemple la surface, l'altitude, des indicateurs topographiques sont ceux de la géographie physique ; les budgets, les PIB, ceux de la géographie économique ; les revenus, la taille du ménage, l'âge de ses membres, ceux de la géographie sociale ; etc.

Dans l'étude de la dynamique des villes, des décennies de travaux ont établi la pertinence de la *taille de la population* (i.e le nombre d'habitants) comme indicateur synthétique de comparaison,

si tant est qu'à la fois les délimitations spatiales utilisées soient compatibles, et que les villes comparées appartiennent à des pays de niveaux de développement économique de même ordre de grandeur [Pum06b]. Pour [Pum97],

[il s'agit d'] « un excellent (et le meilleur) résumé de très nombreuses propriétés fonctionnelles des villes. Beaucoup de descripteurs quantitatifs, comme le nombre d'emplois, d'établissements ou de logements... mais aussi qualitatifs, comme la diversité ou la rareté des activités et la variété des populations présentes, sont corrélés à la taille des villes. C'est la principale « dimension », c'est-à-dire le facteur de différenciation essentiel, dans un système de villes. »

Ordonner les villes selon la taille de leur population s'avère donc très informatif car cela revient aussi en général à établir un classement sur la diversité des activités qu'on peut y trouver, sur le niveau de complexification de son économie. Dans tous les modèles que nous avons présentés dans le chapitre précédent, l'état de la ville, qu'il soit ou non distribué, intègre systématiquement les effectifs de populations associées aux différentes activités humaines représentées.

D'autres classements de villes existent : sont par exemple régulièrement publiés des palmarès de « villes où il fait bon vivre », qui articulent chiffres de l'emploi, prix des loyers, offres en services publics, éducatifs et culturels, surfaces d'espaces verts, conditions climatiques, etc. Une multitude de descriptions, toutes aussi essentielles de ce qui « fait » la ville, sont plus difficilement définissables et quantifiables, et font qu'on les retrouve plutôt dans les oeuvres artistiques : tout ce qui contribue aux ambiances, aux parfums, aux couleurs des villes, ce qui fait dire que « Marseille sera toujours Marseille » ou bien qu'on peut « Voir Naples et mourir ». En comparaison notre regard sur les villes, qui se portera sur leurs seuls effectifs de populations, leurs fonctions urbaines et leur répartition spatiale, est certainement plus aride. Pourtant, même en qualifiant les villes par ces seuls descripteurs, des propriétés émergentes fascinantes car universelles se font jour, aux différents niveaux d'organisation que nous avons mentionnés.

1.3 Des propriétés émergentes au niveau de la ville et au niveau du système des villes

Les concepts de *site* et de *situation*, même si ils ne relèvent pas de propriétés émergentes qui nous intéressent, ont de l'importance. Le site fait d'abord intervenir des descripteurs physiques : la présence d'un cours d'eau, d'une chaîne montagneuse, un climat favorable, les pentes et la stabilité du sol, une position centrale au sein du territoire permettant un accès plus rapide en moyenne à toutes les parties de celui-ci. Tous ces éléments influent évidemment sur les potentialités de développement d'un lieu de peuplement. Le site ne se restreint pas aux seuls éléments physiques naturels, dont les qualités sont d'ailleurs appréciées diversement selon les époques (cf. les oppida en Gaule), mais englobe aussi les artefacts matériels créés et accumulés par les sociétés au cours du temps (bâti, tracés viaires). L'espace garde les traces de la dynamique passée des sociétés. Les qualités d'un site influent sur la *situation* de la ville qui s'y réalise au sein du réseau des villes. Ils constituent des facteurs (externes) qui vont structurer le développement de la ville et guider l'émergence des propriétés émergentes à chacun des niveaux.

Au **niveau des villes**, il est remarquable que dans une très grande majorité de cas, partout dans le monde et à toutes les époques on ait observé des répartitions concentriques de la densité, des prix et des activités, selon une intensité qui décroît du centre historique (noyau initial du peuplement) vers la périphérie. Il faut nuancer en reconnaissant que cette forme mono-centrique est parfois diluée, et qu'elle est aujourd'hui insuffisante pour capturer la variété des formes issues des développements urbains depuis une vingtaine d'années, résultant des changements dans les

comportements de mobilité dans de nombreuses grandes villes, sous l'augmentation croissante des distances parcourables dans un budget temps constant, du développement des centres commerciaux, et d'autres facteurs [Man04, C⁺07, AM04]. Dans plusieurs grandes agglomérations urbaines mondiales on voit émerger des centralités secondaires, des *edge cities*¹, en somme de la péri-urbanisation. Cependant ces évolutions sont toutefois très récentes en comparaison de l'âge de ces villes, et la présence d'un centre unique, polarisant, très densément peuplé au coeur de la ville a longtemps été une constante universelle.

Au **niveau des systèmes de villes**, les propriétés suivantes ont été observées en tout lieu et en toutes périodes :

1. *une régularité statistique dans la distribution des tailles de villes* : au niveau système de villes, partout dans le monde et à toutes les époques, le fait qu'il y ait « une hiérarchie urbaine telle que le nombre des villes suit une progression géométrique inverse de leur taille, constitue une caractéristique remarquable, invariante par rapport aux systèmes politiques, économiques et culturels » [Pum06b].
2. *une régularité dans la disposition des villes dans l'espace*, ce qui est appelé la trame spatiale. La théorie la plus connue proposant une explication formalisée « du nombre, de la taille et de l'espacement des villes » est due à Christaller [Chr33], dont nous avons déjà parlé dans la section 1.3 du chapitre 2.
3. *une diversité fonctionnelle des villes d'un même système*. Cette propriété a été mise à jour depuis longtemps, d'abord au moyen de typologies littérales, descriptives (dans [Pum06b], l'auteur cite le travail d'Aurrousseau dès 1921 pour les villes américaines) puis quantitativement par des classifications statistiques multivariées [Ber64, Pau04, PPVM09]. Cette diversité se traduit, dans les trames spatiales, par une imbrication de villes de spécialités différentes (offrant des services différents et jouant donc un rôle différent au sein du système). Cette répartition « équilibrée » peut être complétée par des phénomènes de concentrations régionales de plusieurs villes de même profil fonctionnel. Elles peuvent résulter des avantages naturels du site pour ladite fonction (gisements miniers, climat permettant les activités touristiques, etc.)
4. *une path-dependency des trajectoires individuelles des villes*, et des décalages temporels entre les villes dans l'adoption des activités associées aux cycles d'innovation successifs.

Ces propriétés dynamiques ne sont pas le résultat d'une stratégie intentionnelle des acteurs institutionnels et économiques, visant à les faire apparaître. Nous allons maintenant nous focaliser sur les modalités spécifiques prises par ces propriétés dans les deux terrains que nous souhaitons comparer en les simulant, l'Europe et les Etats-Unis.

2 Formes urbaines en Europe et aux Etats-Unis : constats

Dans les deux sections suivantes nous désignons par les mots « observation » ou « constat » un fait ou un processus constaté, mesuré, recoupé par plusieurs sources et qui fait consensus chez les géographes. Par « hypothèse » nous qualifions un fait, un processus, une relation causale qui fait matière à débat.

¹parfois traduit en français par « ville lisière », le terme désigne un espace urbanisé périphérique qui concentre des entreprises, des services, des centres commerciaux et de loisirs et situé en dehors mais dans la portée d'une ville traditionnelle, en un endroit où n'existaient auparavant que des banlieues résidentielles ou des communes semi-rurales

Pour des raisons de lisibilité, nous associerons une étiquette à chacune des observations et hypothèses mentionnées dans cette section et la suivante. Chaque étiquette est de la forme $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \rangle$ où :

- \mathbf{x} vaut **Obs** si il s'agit d'une observation, **Hyp** si il s'agit d'une hypothèse ;
- \mathbf{y} vaut **SVilles** si cette observation ou hypothèse est relative au système des villes, **Villes** si elle est relative à la ville ;
- \mathbf{z} est un mot associé à l'observation ou hypothèse.

Par exemple $\langle \mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Vitesses} \rangle$ désignera une observation associée au niveau ville et concernant les vitesses.

2.1 Formes de leurs systèmes de villes

Lorsque l'on analyse les systèmes des villes européen et états-unien, on constate que les deux présentent bien les quatre propriétés émergentes et universelles énoncées dans la section précédente [CPRSJ94, Fav07, BP10]. En revanche, ils se distinguent dans les valeurs et modalités prises par ces propriétés. Ces deux systèmes sont représentatifs de deux grandes classes de systèmes de villes, les systèmes de peuplement anciens et récents [BPVM07]. L'urbanisation en Europe est millénaire, aux Etats-Unis elle s'est faite depuis 300 à 350 ans. Toutes les plus grandes villes européennes sont plusieurs fois centenaires, ce qui n'est pas le cas de Los Angeles par exemple, la deuxième plus grande ville aux Etats-Unis et dont l'agglomération est passée de quelques dizaines de milliers d'habitants au début du XX^{ème} siècle, à plus de 17 millions aujourd'hui [GG97]. La hiérarchie urbaine en Europe fait en outre preuve d'une forte rémanence. Par exemple Paris faisait déjà partie des trois plus grandes villes au début du XIII^{ème} siècle [BBC88]. Tout en étant beaucoup plus jeune, les mesures indiquent que le système des villes états-unien a été, et est encore, globalement plus inégalitaire que l'europpéen. Nous détaillons ces constats dans les sections suivantes.

2.1.1 Distribution hiérarchique du peuplement ($\langle \mathbf{Obs}, \mathbf{SVilles}, \mathbf{H1} \rangle$ et $\langle \mathbf{Obs}, \mathbf{SVilles}, \mathbf{H2} \rangle$)

Ces deux territoires ont des dimensions et une taille de la population de mêmes ordres de grandeur, ce qui donne sens à leur comparaison. Pour autant le peuplement urbain y est différemment organisé. Il y a en Europe beaucoup plus de petites et de moyennes villes : en 2000 on dénombrait plus de 5000 aires urbaines² ayant plus de 10.000 habitants, contre 1000 seulement aux Etats-Unis. En revanche, les très grandes villes sont plus nombreuses aux Etats-Unis : si l'on considère les trente plus grandes villes de la hiérarchie urbaine dans chacun des deux continents, chaque ville américaine est plus grande que la ville européenne de rang équivalent dans la hiérarchie [ME93, ME94].

Les courbes de la figure 3.2 et le tableau de valeurs 1 amènent un double constat :

1. la pente plus marquée de la courbe « rangs vs tailles » (avec deux échelles log) des villes américaines nous indique que la distribution des tailles de villes est plus inégalitaire : la hiérarchie y est plus marquée qu'en Europe. De plus le tableau des coefficients directeurs de la droite d'ajustement de la distribution rang-taille nous indique que c'était déjà le cas en 1950, et en extrapolant les séries de valeurs pour chacun des deux continents, il est raisonnable de penser que c'était déjà le cas pour les dates précédentes ($\langle \mathbf{Obs}, \mathbf{SVilles}, \mathbf{H1} \rangle$).

²sans tenir compte de la Russie

2. la distribution statistique du peuplement urbain est régulière dans les deux systèmes, et les structures hiérarchiques tendent à devenir plus marquées au cours du temps, ce que traduit l'augmentation de la valeur des coefficients directeurs de la droite d'ajustement au cours du temps (cf. tableau ??) (**<Obs, SVilles, H2>**).

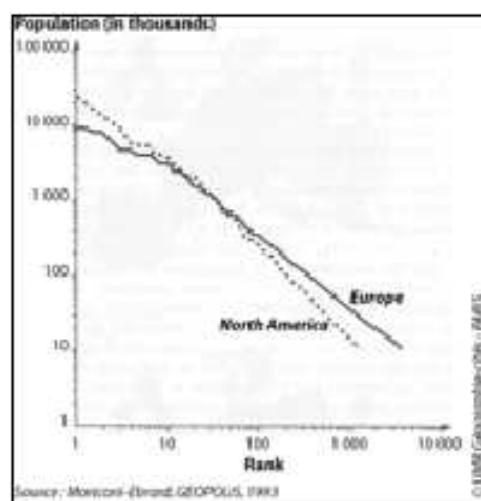


FIG. 3.2 – Courbes rangs-tailles actuelles des systèmes de villes européen et états-unien. Cette régularité universelle de la distribution des tailles de villes dans les systèmes de villes, nationaux ou continentaux, et telle que le nombre de villes suive une progression géométrique inverse de leur taille, est connue sous le nom de « loi de Zipf ». On voit que la pente est plus marquée aux Etats-Unis. On dira que le système des villes états-unien est (hiérarchiquement) plus inégalitaire : les grandes villes sont plus grandes, les petites plus petites, et il y a moins de villes.

	1800	1850	1900	1950	2000
Europe	0.69	0.77	-	0.91	0.94
Etats-Unis	-	-	0.91	1.09	1.20

TAB. 1 – L'évolution des coefficients directeurs des droites d'ajustements des distributions rangs-tailles (sur une échelle log-log) en Europe et aux Etats-Unis, entre 1800 et 2000 (issus de [ME93]). 2 tendances apparaissent : dans chacun des systèmes la pente croît au cours du temps, et la pente a toujours été plus marquée aux Etats-Unis.

2.1.2 Trames spatiale et fonctionnelle

Lorsque l'on regarde la répartition des villes dans l'espace, on observe là-aussi des contrastes importants. L'écart dans le nombre de villes se traduit par des espacements plus importants entre les villes américaines. Lorsque l'on regarde les deux semis des villes, c'est particulièrement frappant pour l'ouest du fleuve Mississippi, où les distances séparant les villes sont plus importantes qu'à l'est, ces dernières étant elles-mêmes plus importantes que celles observées en Europe (**<Obs, SVilles, Espacements>**).

Les systèmes de villes neufs comme celui des Etats-Unis se caractérisent par un peuplement du territoire qui s'est fait séquentiellement, le long de la progression d'un front pionnier coloni-

sant l'espace d'est en ouest. Dans les systèmes anciens au contraire, comme l'Europe ou l'Inde, l'urbanisation s'est faite à peu près au même rythme en parallèle en plusieurs endroits éloignés du territoire, sur la base des mêmes technologies [CPRSJ94, BGM08, Bai85] (**<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>**).

Au contraire de l'Europe, les Etats-Unis ont pu appuyer fortement les phases initiales de leur développement sur des échanges de plus longue portée, internationaux, c'est à dire avec l'*extérieur* du système, via les grandes villes portuaires de la côte est. En Europe, d'une part les frontières nationales ont toujours joué un rôle limitant dans les interactions spatiales entre villes situées de part et d'autre d'une frontière, et d'autre part l'urbanisation était déjà bien entamée au moment où la diminution du coût des transports a permis la mise en place d'un commerce maritime mondial [BBC88, Bai85] (**<Obs, SVilles, Transports>**). En Europe, depuis le redémarrage de l'urbanisation avec le commerce au Moyen-Age (13^{ème}-14^{ème} siècle) jusqu'à la révolution industrielle, ce sont cinq siècles d'urbanisation en progression lente et avec des vitesses de transport lentes.

Enfin une autre caractéristique américaine est « la corrélation très étroite qui existe entre chaque cycle d'innovation, les gisements qui lui sont associés et la croissance extrêmement brutale de nouvelles métropoles régionales » [BP10] (**<Obs, SVilles, Gisements>**).

Un autre constat découle du précédent : il y a aux Etats-Unis des trajectoires de villes jamais vues en Europe : Los Angeles qui en partant de très loin devient en cent ans la deuxième ville du système, mais aussi Seattle, San Francisco, Dallas, Houston, qui sont des agglomérations urbaines qui sont aujourd'hui dans les 15 villes les plus importantes tout en étant deux fois plus jeunes au moins que les villes de la côte est (**<Obs, SVilles, Trajectoires>**).

2.2 Formes de leurs villes

Les villes européennes et états-uniennes, si elles forment deux ensembles dont chacun est en lui-même hétérogène, présentent quand même suffisamment de différences pour que géographes et urbanistes généralisent ces écarts en deux modèles de ville [GG98, Ber04, Man04, BD10]. Outre leurs dissemblances en termes de paysages urbains (« passage brutal de la verticalité des centres à l'horizontalité des périphéries aux États-Unis, gradient plus régulier en Europe » [BD10]), en résumé et en moyenne, villes européennes et villes américaines n'ont ni les mêmes géométries, ni ne présentent les mêmes formes d'organisation interne de leur espace. Nous détaillons ce constat dans les deux sous-sections suivantes.

2.2.1 Géométrie

Une différence majeure et historique réside dans la géométrie des réseaux viaires des villes de chacun des deux continents. Nous appelons géométrie des réseaux viaires la combinaison de :

1. leur topologie ;
2. le schéma de vitesses de déplacements qui s'y superpose.

Topologie des réseaux viaires et planification (<Obs, Villes, Réseaux>). Le premier aspect est que les topologies des réseaux de ces deux grands types de villes sont aujourd'hui différentes, et l'ont toujours été : à la ville européenne le plan radioconcentrique, à la ville américaine le plan hippodamien (*i.e.* en grille). Même si à l'intérieur de chacun des conti-

nents, certaines villes s'écartent bien sûr de ces schémas généraux³, il reste pertinent pour les géographes de parler de deux topologies caractéristiques des deux continents [BG95, BD10]. A titre d'exemple, la figure 3.3 représente les réseaux viaires des villes de Phoenix et de Milan, que nous avons choisis parce que ce sont des « cas d'écoles » représentatifs de ces deux grands types de réseaux.

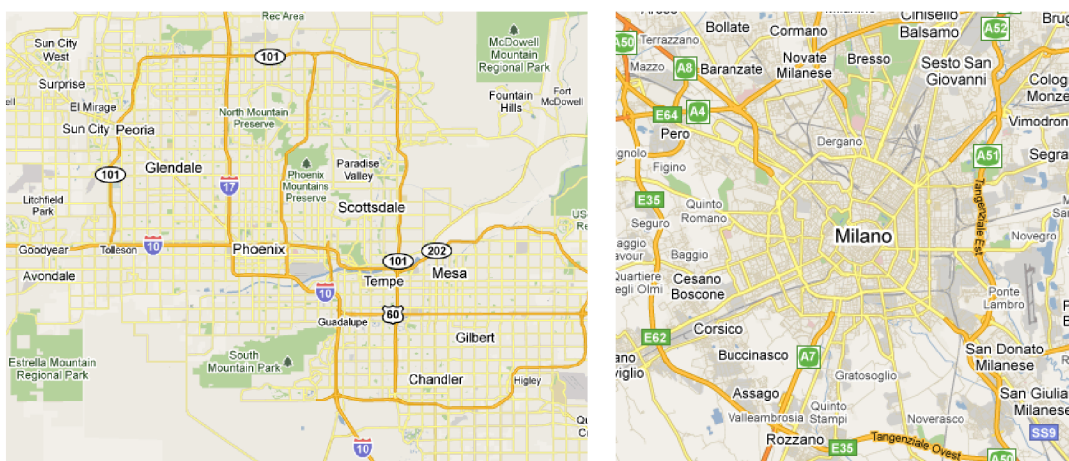


FIG. 3.3 – Les réseaux viaires actuels des villes de 3.3(a) Phoenix, Arizona et 3.3(b) Milan, Italie. Les deux plans ne sont pas à la même échelle, le but est de faire voir la répétition de la forme du réseau dans l'espace (issus de Google Maps).

Transports et Vitesses (<Obs, Villes, Vitesses>). Lorsqu'ils font des études de transports, les spécialistes distinguent les modes TC (transports collectifs) et VP (voiture particulière). Mesuré en volume d'usagers, le ratio entre volume TC et volume VP nous indique la pondération à appliquer aux vitesses de déplacement permises par chacun de ces modes pour se faire une idée de la vitesse moyenne de déplacement dans la ville. Aux Etats-Unis, le poids des transports collectifs est négligeable par rapport à celui de la voiture particulière. On estime ainsi que 90% des actifs se déplacent en voiture [Ha06]. En Europe, de façon très résumée, la place prise par les TC dans les déplacements est nettement plus importante qu'aux Etats-Unis, mais ils sont moins rapides en moyenne que la voiture particulière.

La conséquence est que lorsque l'on souhaite comparer les vitesses de déplacement à l'intérieur des villes en Europe et aux Etats-Unis, il n'est pas déraisonnable d'assimiler cette vitesse à la seule vitesse moyenne des déplacements en voiture particulière dans le cas des Etats-Unis, et de faire une moyenne entre TC et VP dans le cas des villes européennes.

On peut se faire une idée plus nette de ces différences de vitesse de circulation en comparant les résultats de deux enquêtes récentes [LM09, Ha06], synthétisée dans le tableau 2. Cette comparaison peut se résumer ainsi : en moyenne, dans le même intervalle de temps, le navetteur états-unien peut parcourir une distance environ deux fois plus grande que son homologue européen. Cela revient aussi à dire que les différences d'accessibilité entre les quartiers de la ville ne sont pas les mêmes dans les deux cas, et que la ville nord-américaine est spatialement moins inégalitaire : on y observe moins de différences d'accessibilité entre les quartiers que dans la ville

³Boston et ses radiales par exemple, ou Barcelone et son extension en damier. Plusieurs grandes villes européennes (Turin, Lisbonne, Madrid) présentent également des quartiers qui suivent ce type de plan en damier, à l'intérieur d'un schéma radioconcentrique englobant.

européenne.

Ile-de-France [LM09]	20 km.h ⁻¹
Moyenne sur 28 aires métropolitaines US [Ha06]	21.1 miles.h ⁻¹ (\approx 34 km.h ⁻¹)

TAB. 2 – Vitesses moyennes de circulation intra-urbaine des naveteurs franciliens et des naveteurs américains (calculée en moyenne sur 28 aires métropolitaines).

2.2.2 Schémas de répartitions dans l'espace intra-urbain

Emprise spatiale (<Obs, Villes, Emprise spatiale>). Tout d'abord, comme l'ont mis en évidence Bretagnolle et Delisle pour l'ensemble formé par les villes entre un et trois millions d'habitants des deux continents, la surface d'une ville états-unienne est en moyenne deux fois plus grande que celle d'une ville européenne [Del08]. La figure 3.4, qui confronte les surfaces occupées par deux villes de même taille de population, Atlanta et Barcelone, illustre ce contraste dans l'emprise spatiale des villes. La figure 3.5 rend particulièrement visible le caractère systématique de ces différences de densité entre aires métropolitaines des deux systèmes.

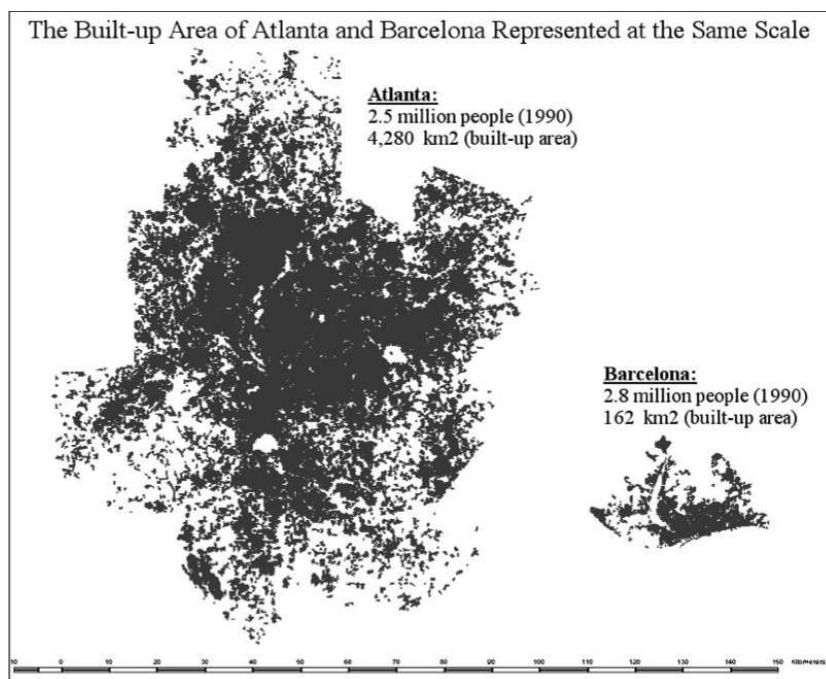


FIG. 3.4 – L'emprise spatiale de deux villes de même taille de population, Atlanta et Barcelone (extrait de [BM03]).

Répartition spatiale de la densité (<Obs, Villes, Densités>). Surtout, les formes des répartitions à l'intérieur de la ville sont différentes. Pour ce qui est des densités d'occupation de l'espace, celles-ci chutent plus vite en Europe lorsque l'on s'éloigne du centre des villes qu'aux Etats-Unis, ce qui revient à dire que le gradient centre-périphérie est plus marqué dans les villes européennes. Cela a notamment été illustré par Bertaud et Malpezzi [BM03] qui ont montré le caractère systématique de cette observation en calculant ce gradient pour une cinquantaine de métropoles mondiales (cf. figure 3.5 page 77).

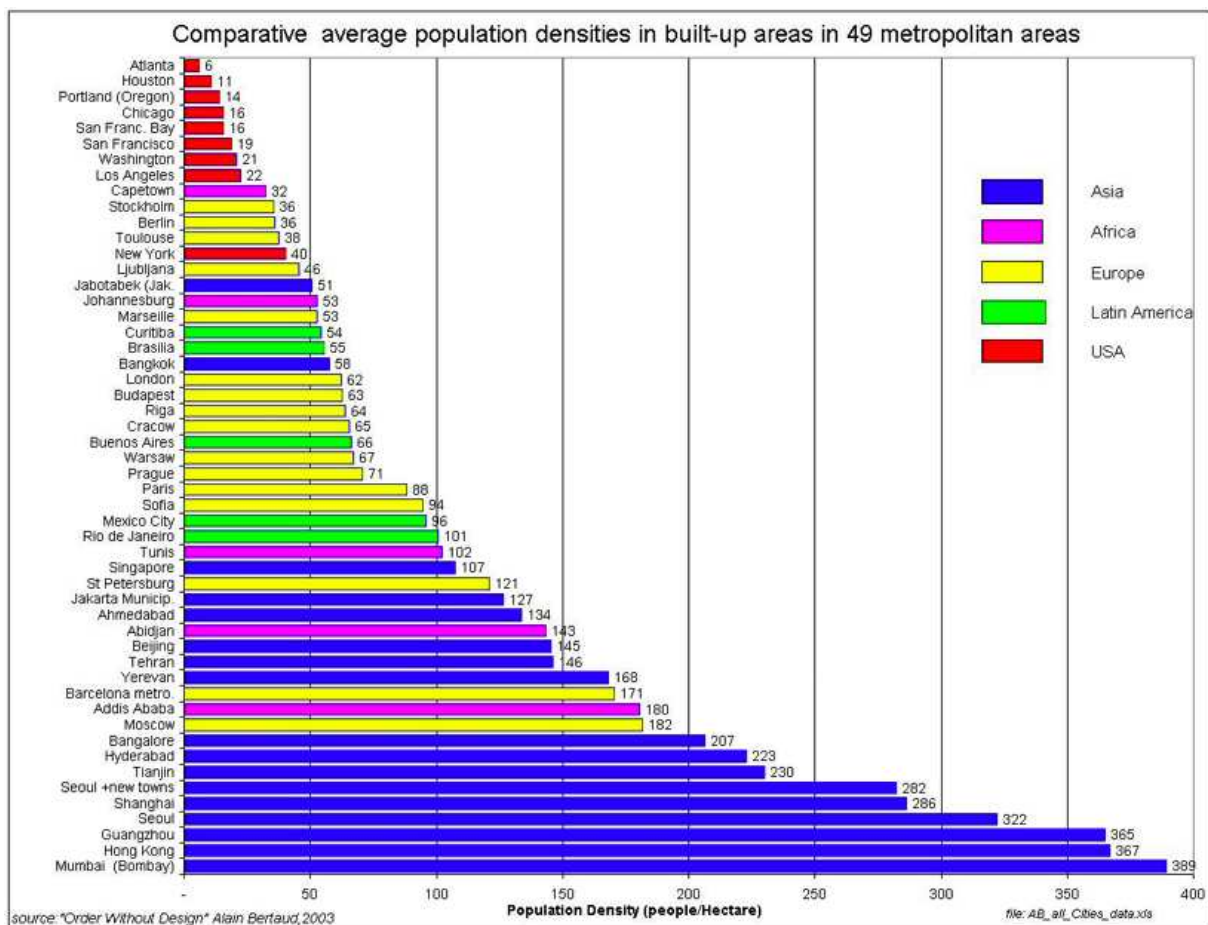


FIG. 3.5 – La densité moyenne de population dans 49 aires métropolitaines mondiales. Les villes états-uniennes sont en rouge et les villes européennes en jaune (extrait de [BM03]).

Répartition spatiale des prix (<Obs, Villes, Prix>). Pour ce qui est des prix, plusieurs études sur les rentes foncières ont montré que celles-ci se répartissent spatialement de façon différente : si la progression des prix en fonction de la distance au centre suit bien une exponentielle négative dans les villes des deux continents, tel que le décrit le modèle classique d'Alonso [Alo64] pour une ville monocentrique, le gradient centre-périphérie est une fois encore plus marqué en Europe [Ber04].

Répartition spatiale des résidents et des activités (<Obs, Villes, Activités>). La ségrégation sociale se traduit en ségrégation spatiale de façon plus marquée dans les villes états-uniennes : les *ghettos*, les *gated communities*⁴, l'étalement résidentiel péri-urbain des classes moyennes, sont des phénomènes spatiaux qui, avant de se diffuser dans les villes d'Europe ces vingt à trente dernières années, ont tout d'abord touché les villes américaines, et avec plus d'intensité [GK04, Man04, GG98]. Ce zonage plus poussé de l'espace ne se restreint pas au résidentiel, il concerne également les activités économiques et administratives. La revitalisation actuelle des centre-villes américains est remarquable par contraste avec la désertion des classes moyennes et aisées dont ils ont été victimes, au profit de la banlieue, donnant lieu au développement des

⁴quartiers résidentiels où opère une ségrégation intentionnelle et assumée de ses habitants. L'accès en est protégé et les espaces « publics » privatisés.

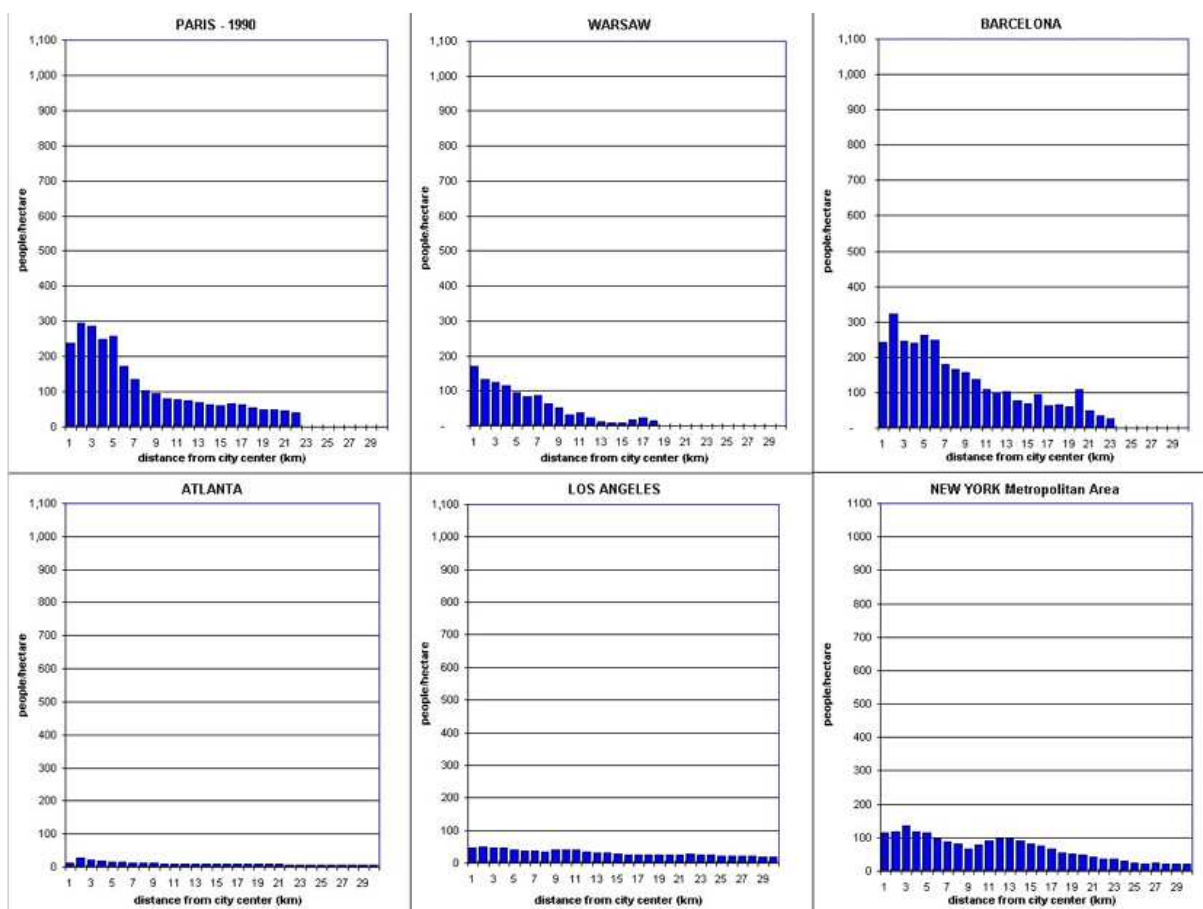


FIG. 3.6 – Les courbes d'évolution de la densité de population en fonction de la distance au centre de trois villes européennes (Paris, Varsovie, Barcelone), et trois villes états-uniennes (Atlanta, Los Angeles, New York) (extraites de [BM03]).

inner-city, quartiers délabrés des centre-villes où s'entassent les populations les plus déshéritées [Gay70]. De façon corollaire, c'est la même idée qui s'exprime lorsque l'on dit que la mixité fonctionnelle et sociale est plus forte en Europe.

Ces quatre types de différences observées, surface, gradient de densité, gradient des prix et répartition des résidents et des activités, seront qualifiées par la suite, globalement, de *différences dans les répartitions spatiales*.

3 Morphogénèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis : hypothèses

Dans la section précédente nous avons identifié plusieurs observations inspirées de la comparaison entre structures urbaines en Europe et aux Etats-Unis. Dans cette section, nous allons maintenant énumérer des hypothèses qui sont proposées pour expliquer ces observations, dans un cadre dynamique. Nous commençons par les énoncer « littéralement » (section 3.1 pour les systèmes de villes et 3.2 pour les villes), puis nous en proposons une reformulation plus schématique, préalable à leur mécanisation et à leur programmation (section 3.3).

3.1 Hypothèses pour les systèmes de villes

3.1.1 Théories générales

Un premier modèle explicatif de la structure hiérarchique universelle et intemporelle des systèmes des villes fut proposé au début des années 1930 par le statisticien français Robert Gibrat [Gib31]. Il montra qu'un modèle dans lequel le taux de croissance des villes est indépendant à la fois de leur taille, de leur localisation et des valeurs passées de ce taux, aboutit, si on le fait itérer suffisamment longtemps, à une distribution de population log-normale : la population des villes décroît géométriquement en descendant dans la hiérarchie, et cette décroissance peut être capturée par une fonction exponentielle. Ce modèle à taux indépendant traduit en fait l'idée que le système des villes se développe dans toutes ses composantes : toutes les villes bénéficient en moyenne de la croissance à l'identique, mais à chaque fois avec un petit écart. Les écarts de taille qui se créent aux premières itérations augmentent au cours du temps. L'adéquation de ce modèle a été maintes fois démontrée pour de nombreux systèmes de villes du monde, et à toutes les époques de leur histoire (voir par exemple les ouvrages de [Pum82] et [GP93], qui confrontent ce modèle au système des villes françaises). La limite de ce modèle dynamique et générique est qu'il ne propose pas de schéma interactionnel et spatial permettant d'expliquer comment les relations d'inter-dépendance entre les villes aboutissent à homogénéiser leurs taux de croissance.

La théorie évolutionnaire urbaine (<**Hyp, SVilles, Theo.Evol**>) défendue par les géographes du laboratoire Géographie-Cités, et formulée comme telle pour la première fois dans [Pum97], cherche à répondre à ces manques. Elle postule que les systèmes de villes sont complexes, largement auto-organisés, et que cette complexité apparaît, se structure et se maintient dans les relations qu'entretiennent les villes entre elles. Celles-ci sont analysées comme des entités localisées, pourvues de fonctions individuelles, capables d'interactions spatiales de différents types. Ces fonctions, suivant les types de biens qu'elles produisent (administratives, biens communs, innovantes, ...) ont des rayonnements et des portées spatiales différentes. Toutes donnent lieu à la constitution de réseaux d'échanges entre les villes. De façon synthétique, la théorie propose un découpage des relations entre villes selon deux logiques :

- de la collaboration d'une part, qui s'exprime par des échanges (achats et ventes) de leur production. Elle donne lieu à des relations d'inter-dépendances.
- de la compétition pour l'acquisition des innovations d'autre part, qui apparaissent par cycles dans le système.

Sur ce dernier point, la théorie ne cherche pas à expliquer l'apparition en elle-même des innovations dans le système, mais la manière dont celles-ci se diffusent. Pour cela elle s'appuie sur la théorie de la diffusion spatiale des innovations [Häg67], en insistant sur le fait que c'est essentiellement la position relative de la ville au sein de la hiérarchie urbaine, donc sa trajectoire passée, qui déterminent ses chances d'être pionnière pour capter les innovations associées aux cycles économiques successifs. Les plus grandes, les plus riches, celles qui avaient déjà capté les cycles précédents sont avantagées, mais les avantages liés au site sont également déterminants, dans le cas où l'innovation procède de ressources naturelles indispensables à son expression (villes portuaires, gisements miniers, etc.).

Les demandes (inégaux), le fonctionnement des marchés d'échanges entre villes entraînent de la croissance différenciée entre secteurs d'activités internes à la ville, qui attirent de la main d'oeuvre venue d'autres villes, et une croissance différenciée entre les villes. Si, comme dans le modèle de Gibrat [Gib31], toutes bénéficient d'une croissance démographique conjoncturelle (qui relève de l'histoire, et que la théorie ne cherche pas à expliquer), contrairement à celui-ci la

théorie propose donc un ensemble de processus *génératifs, spatiaux et interactionnels*, candidats à rendre compte de l'émergence et du maintien d'une distribution hiérarchique du peuplement.

3.1.2 Distribution hiérarchique du peuplement et trame spatiale

Pour les géographes, les explications aux différences hiérarchiques entre Europe et Etats-Unis sont alors à chercher avant tout :

1. dans les technologies de transport maîtrisées au moment de l'émergence et de la structuration de ces systèmes (**<Obs, SVilles, Transports>**) ;
2. dans les modes de colonisation de l'espace, continu dans un cas (Europe), disruptif dans l'autre (E.-U.) (**<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>**).

Sur le premier point, la maîtrise de technologies de transports se traduit en de meilleures capacités à s'affranchir des distances, et donc en des portées plus grandes pour les échanges. Celles disponibles lors de l'urbanisation des E.-U., le chemin de fer puis la voiture, sont beaucoup plus rapides que la marche et le transport animal, avec lesquels s'est fondée l'urbanisation en Europe [Bre09]. Pour un budget-temps fixé, la distance parcourue est plus grande, et moins de noeuds intermédiaires sont nécessaires pour assurer les échanges. Cela contribuerait à expliquer pourquoi il y a moins de villes aux Etats-Unis, et pourquoi elles ont « poussé » plus loin les unes des autres. Cela contribuerait également à expliquer la hiérarchie plus inégalitaire.

Sur le second point, il faut ajouter que l'urbanisation états-unienne s'est faite dans un pays avec peu de population rurale, et n'ayant alors que des populations peu denses [ME93]. Le peuplement selon un front pionnier sur un territoire « vide » entraîne des différences d'ancienneté relatives des villes de ce système jeune, qui expliquerait aussi la structure plus inégalitaire de sa hiérarchie urbaine.

3.1.3 Trames spatiales et fonctionnelles

Comme éléments additionnels d'explication de la trame spatiale et de l'ancrage spatial des spécialisations fonctionnelles très marqué sur le territoire américain, en comparaison des motifs plus homogènes observés en Europe, il faut tenir compte de la géographie de ces territoires, des qualités naturelles des sites, du climat et la présence de bassins de ressources (**<Obs, SVilles, Gisements>**) :

1. Les barrières naturelles que sont les zones désertiques et montagneuses de l'ouest et du sud des Etats-Unis ont rendu moins favorables ces sites pour l'établissement durable de villes, ce qui explique aussi le desserement du semis des villes à l'ouest du Mississippi ;
2. La variété géographique exceptionnelle du territoire des E.-U. a entraîné une spécialisation poussée et la corrélation entre cycles d'innovations et sites : grand commerce fluvial le long du Mississippi, industrie lourde autour des grands lacs du nord-est, industrie automobile dans la région de Detroit, gisements pétroliers au Texas et en Californie, et NTIC attirées par les climats et les conditions de vie de la *sun belt*, et de la Californie en particulier.

3.2 Hypothèses pour les villes

3.2.1 Géométrie

Topologies des réseaux viaires. Là aussi, les différences sont à relier aux temporalités sur lesquelles ces villes se sont mises en place, au rôle joué par la planification dans un cas, et à son absence de rôle dans l'autre. La ville européenne, qui s'est construite par accumulation

progressive de peuplement autour d'un centre historique (le noyau initial), hérite de ce plan généralement radioconcentrique, gardant la trace, avec ses boulevard circulaires, de ses enceintes successives, détruites au fur et à mesure de l'expansion spatiale de la ville, elle-même nécessaire pour répondre au manque de place dans les limites des enceintes.

L'urbanisation américaine est bien plus récente et, dans ses prémices, la planification y a joué un rôle important. La grille, dont la maille orthogonale élémentaire semble se reproduire à l'infini, n'est pas spécifique au seul niveau de la ville dans l'organisation du territoire américain : on la retrouve également à un plus haut niveau de l'échelle spatiale, pour la délimitation des états [Man04]. Ces découpes régulières sont en phase avec les idées directrices de l'aménagement du territoire de la fin du 18^{ème} siècle, au moment où l'arrivée massive de migrants européens met en route le mouvement de colonisation du territoire et la « conquête de l'Ouest », en suivant un front pionnier qui couvrira tout le territoire d'est en ouest, jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle [BGM08]. Le carrefour en croix de la grille américaine instancie spatialement une idée, celle de la recherche d'égalité d'accès entre les lieux de la ville. Dans une grille régulière, chaque noeud est connecté au même nombre de voisins que tous les autres noeuds. Au contraire, dans un plan radioconcentrique le noeud central possède plus de voisins, et il est donc plus accessible que les quartiers des ceintures.

Ces différences dans la topologie des réseaux viaires peuvent donc se lire comme l'opposition entre d'un côté une forme ayant émergée d'un développement sur le temps long, et de l'autre une forme réfléchie *a priori*, imprégnée d'idées urbanistiques contemporaines de sa conception [GG98]. Dans les deux cas, une fois qu'elle s'est ancrée, la forme du réseau impose des contraintes très fortes, et elle est très difficilement modifiable. Ses développements ultérieurs sont très fortement dépendants de cette impulsion initiale, et se sont souvent faits par reproduction du motif initial [Man04, BD10].

Transports et vitesses. La construction de nombreuses villes nord-américaines (en particulier les villes de l'ouest les plus récentes) a été contemporaine de l'essor de l'industrie automobile, de la construction des réseaux d'autoroutes et de l'essor de la voiture individuelle dans l'ensemble du pays. Dans ces villes la largeur des voies a pu être dès le départ adaptée à ce mode de transport. Ce sont ces infrastructures routières mieux adaptées à l'usage intensif de la voiture qui expliquent que les vitesses moyennes de déplacement sont plus élevées dans les villes aux Etats-Unis que dans les villes en Europe.

Nous voyons que les explications des observations relatives aux différences de topologie (<Obs, Villes, Réseaux>) et de vitesses des transports (<Obs, Villes, Vitesses>) relèvent de choix intentionnels de planification territoriale. Le pouvoir d'influence historique des grandes entreprises américaines de l'automobile a également contribué à limiter le développement des transports collectifs dans les villes américaines, ce qui explique qu'ils n'y font pas concurrence à la voiture. Ces explications n'ont pas vraiment le statut d'hypothèses, elles relèvent plutôt de connaissances qui font consensus chez les géographes comme chez les spécialistes des transports.

3.2.2 Schémas de répartitions dans l'espace intra-urbain

D. Pumain fait état dans [Pum06b] de deux théories principales développées par l'économie spatiale et dont l'objectif est d'expliquer la genèse de la « structure du champ urbain en auréoles d'intensité décroissante à partir du centre, selon un fort gradient centre-périphérie », telle que nous l'avons constaté dans les observations <Obs, Villes, Densités>, <Obs, Villes, Prix> et <Obs, Villes, Activités> :

1. La première est celle de l'économiste Alonso [Alo64] et montre que pour ce qui est du résidentiel, des stratégies d'arbitrage rationnel des ménages, entre budget consacré au logement et budget consacré au transport, aboutissent à cette structure centre-périphérie (**<Hyp, Villes, Loc.Res>**);
2. L'autre grande classe d'explications, plus générale car elle englobe à la fois le résidentiel et les activités économiques, place la cause de ces répartitions dans la rente différenciée (le profit tiré de la localisation ou de la propriété du sol). Selon celle-ci, si l'on retrouve dans les quartiers centraux, plus accessibles et donc nécessairement plus chers, les activités urbaines générant la plus grande valeur ajoutée (banques, services financiers, consultance stratégique, etc.), c'est parce que ce sont celles qui peuvent payer ces localisations centrales, qui leur sont stratégiquement indispensables, pour leur accès, leur visibilité et leur prestige. Viennent ensuite, dans la structure intra-urbaine auréolaire générée par ce schéma, des quartiers où l'on trouve les activités commerciales de haut niveau, ensuite seulement les résidences, et enfin les activités industrielles en voie d'obsolescence (anciens cycles d'innovations) et consommatrices d'espace, qui se retrouvent généralement loin des quartiers centraux. Dans ce schéma explicatif, les interactions entre les entités (les ménages et les entreprises) s'inscrivent dans *une compétition à ressources inégales pour l'accessibilité*, celle-ci étant très souvent assimilée à la seule centralité dans les modèles d'économie spatiale, qui raisonnent sur des espaces théoriques très simples, composés d'un centre et d'une périphérie, elle-même souvent indifférenciée [FT97, FKV01] (**<Hyp, Villes, Loc.Gen>**).

Ces deux ensembles de processus interprétatifs des localisations sont génériques, ils cherchent à expliquer la structure auréolaire des villes en s'appuyant sur un espace support centre-périphérie. Ils peuvent s'appliquer tout aussi bien en théorie aux villes états-uniennes qu'aux villes européennes, de même qu'aux villes d'autres continents, tant qu'il reste pertinent de lire l'espace intra-urbain selon un modèle centre-périphérie. Ils sont aussi paramétrables : comme ils ne font pas d'hypothèses fortes sur la réalisation effective de cet espace, ils peuvent être testés sur toute une gamme d'espaces, dès lors que celui-ci est différencié en termes d'*accessibilité*.

En plus de ces processus génériques, D. Pumain rappelle dans [Pum06b] que d'autres éléments d'interprétation plus spécifiques viennent s'additionner :

1. les qualités d'un site naturel, la présence d'un équipement d'utilisation collective (transport, école, centre commercial) ou d'un élément de patrimoine, qui vont déformer localement les surfaces de densités et de prix prévues par le modèle théorique (**<Hyp, Villes, Site>**).
2. des contraintes institutionnelles, associées à la législation du pays auquel la ville appartient. Pour le cas de notre comparaison, la réglementation nord-américaine sur les transactions immobilières contribuerait à amplifier la mobilité résidentielle (deux fois plus élevée que dans les villes d'Europe), et la plus grande importance de la valeur du bien immobilier pour les ménages expliquerait la tendance plus grande à l'entre-soi, à une ségrégation résidentielle délibérée. En étant entouré uniquement de logements occupés par des ménages de niveaux de revenus comparables, la valeur de leur bien immobilier est moins sensible aux fluctuations [Man04] (**<Hyp, Villes, Legislation>**).
3. des valeurs culturelles des populations, qui s'expriment par des comportements spatiaux différenciés. Certains auteurs mettent en avant une préférence culturelle américaine pour la vie à la campagne, voire un rejet de la ville [GG98] comme facteur à prendre en compte pour comprendre l'ampleur de la péri-urbanisation. Dans le même ordre d'idées, la valorisation plus importante des centres-villes historiques en Europe, à la fois lieux d'accumulation des symboles de richesse et de pouvoir et lieux de mémoire de l'histoire de la ville, contribuerait

à y rendre le centre comparativement plus attractif qu'aux Etats-Unis, où les villes ont accumulé très peu de valeur dans leur centre (à l'exception de quelques-unes parmi les plus anciennes villes de la côte est, New-York et Boston par exemple) (<**Hyp, Villes, Culture**>).

Il faut bien voir que tous ces schémas explicatifs sont dynamiques et porteurs de rétroactions : ils créent de la structure, le résultat de leur action consiste en l'établissement d'une organisation durable du champ urbain. Celle-ci va en retour contraindre les dynamiques des acteurs. Elle peut les amplifier, par exemple en faisant apparaître des possibilités d'économies d'agglomération⁵, d'urbanisation⁶ voire d'apprentissage⁷. Mais elle peut aussi les limiter : d'une part l'espace est indivisible, d'autre part les images et les représentations associées à un quartier freinent ses possibilités ultérieures de reconversion.

Nous avons dissocié les observations et les hypothèses faites aux deux niveaux d'organisation que sont la ville et le système des villes. Les hypothèses que nous avons énoncées sont cloisonnées dans chacun de ces niveaux. Pour expliquer l'apparition des propriétés des systèmes de villes, les hypothèses n'ont recours qu'à des processus impliquant les villes vues comme des entités atomiques et indécomposées. Elles ne prennent pas en compte la « qualité » de l'organisation interne des villes comme un facteur pouvant influencer la trajectoire de celles-ci au sein du système. Les théories cherchant à articuler cette performance spatiale interne de la ville à sa performance dans le système sont encore très rares. Elles sont difficiles à formuler et quantifier. Notre intuition nous indique qu'il y a bien une continuité d'actions et d'effets entre ces niveaux d'organisation spatiale. Si un papillon peut en un battement d'ailes changer le climat, un individu ne pourrait-il pas en théorie changer le devenir des villes ? Il est néanmoins clair qu'il existe des barrières. Chercher des processus dynamiques liant quartiers, villes et système des villes est une démarche qui se fait pour l'instant à l'« aveugle », tant le cadre est large, que les liens sont difficiles à cerner, et qu'il est difficile d'isoler des données auxquelles les confronter pour les vérifier. Sur un terrain friable comme celui-ci, un modèle de simulation permet au moins de formuler ces théories et de raisonner sur des hypothèses, et l'exercice de la formalisation multi-niveaux impose de réfléchir à la fois à des ontologies géographiques multi-niveaux, mais aussi à imaginer des techniques informatiques pour simuler ces systèmes dynamiques multi-niveaux. Nous reviendrons sur ces points dans le chapitre 6.

Les tableaux 3 et 4 récapitulent les observations et hypothèses que nous avons énoncées pour chacun des niveaux. Nous allons maintenant voir à partir de quels mécanismes plus élémentaires nous pouvons aborder la transcription calculatoire de ces processus morphologiques.

3.3 Vers une mécanisation des hypothèses génératives des formes urbaines

Peut-on donner des formes stylisées aux processus que nous venons de lister, pour tenter de régénérer *in silico* les observations faites sur les formes d'organisation urbaine en Europe et aux Etats-Unis ? Cela formerait-il une preuve de leur action passée ? En modélisation en sciences sociales certains chercheurs considèrent que c'est au moins une condition nécessaire, en affirmant que « *if you don't grow it, you don't explain it* », dans la lignée d'une tradition

⁵Profits résultant de la localisation à proximité d'autres entreprises (sous-traitance, synergies) et d'un marché du travail pour l'emploi (capital humain) et la vente de la production

⁶Profits liés à l'utilisation indivise d'équipements financés en partie par la puissance publique (aéroports, gares, universités, équipements culturels, ...)

⁷Profits qui découlent des capacités d'innovation accrues par les échanges réguliers avec d'autres acteurs urbains, permis par la proximité. Pour certains il s'agit d'une composante déterminante des « milieux innovateurs » [Pum06b]

Observations	<Obs, SVilles, H1> : le système des villes états-unien est plus hiérarchique que l'europpéen.
	<Obs, SVilles, H2> : les deux systèmes de villes deviennent de plus en plus hiérarchiques au cours du temps.
	<Obs, SVilles, Colo.Spatiale> : la transition urbaine aux Etats-Unis s'est faite sur un territoire quasi-vierge de peuplement rural et selon un front pionnier. En Europe elle s'est faite de façon continue sur un continent déjà hiérarchisé.
	<Obs, SVilles, Gisements> : la géographie du territoire a entraînée une forte corrélation entre régions du territoires et innovations aux Etats-Unis.
	<Obs, SVilles, Ports> : les grandes villes portuaires de la côte est américaine ont permis aux Etats-Unis de s'appuyer plus tôt sur les échanges internationaux.
Hypothèses	<Obs, SVilles, Transports> : les technologies de transport se sont améliorées plus tôt aux Etats-Unis, entraînant des portées plus longues plus tôt dans les interactions spatiales entre villes.
	<Hyp, SVilles, Theo.Evol> : les processus géographiques constituant la théorie évolutionnaire urbaine permettent de rendre compte de l'émergence, dans l'espace et dans le temps, des propriétés observées dans tous les systèmes de villes
	<Hyp, SVilles, Theo.Evol++> : les processus de la théorie évolutionnaire urbaine, si on leur ajoute les processus spécifiques <Obs, SVilles, Colo.Spatiale>, <Obs, SVilles, Gisements>, <Obs, SVilles, Transports> et <Obs, SVilles, Ports>, permettent de régénérer les différences d'organisation <Obs, SVilles, H1> et <Obs, SVilles, H2>

TAB. 3 – *Systèmes des villes*. Observations et hypothèses faites en comparant les formes et les morphogenèses des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis.

logiciste et mécaniste de l'explication et de la compréhension. Nous sommes ici à la croisée de deux problèmes difficiles et anciens, celui de la preuve en géographie [Har69] et celui de l'apport de connaissances nouvelles sur un système que l'on peut tirer de simulations en sciences sociales [Cas97, Var07, Liv06]. Nous pensons tout de même sur ce point que *le statut de candidat à l'explication se trouve renforcé* lorsque les processus génératifs, invoqués par une explication hypothétique, peuvent être reconstruits dans un cadre formel et objectif.

La majorité des hypothèses formulées dans les deux sous-sections précédentes font intervenir des processus de localisation d'agents géographiques dans l'espace (parmi l'ensemble des villes, ou à l'intérieur de l'espace d'une ville), et des processus d'échanges au sein de marchés constitués par ces agents. Le terme « agents géographiques » englobe à la fois les agents de niveau micro (ménages, individus, acteurs institutionnels, entreprises), que nous avons beaucoup vus dans les modèles de la littérature que nous avons présentés, mais aussi les agents de niveau meso, qui sont des entités agrégées qui trouvent leur pertinence dans la description de dynamiques de long-terme, comme la fonction urbaine et la ville, vues comme des entités décisionnelles.

Etant donné un espace de référence et des agents géographiques localisés dans cet espace, nous pouvons exprimer ces processus de localisation à partir de quatre grandes classes de processus

Observations	<Obs, Villes, Densités> : le gradient centre-périphérie des densités est plus fort en Europe
	<Obs, Villes, Prix> : le gradient des prix est plus fort en Europe
	<Obs, Villes, Activités> : il y a plus de zonage dans les villes états-uniennes, plus de mixité spatiale dans les villes européennes
	<Obs, Villes, Réseaux> : dans la grande majorité des cas, le plan des villes européennes est radioconcentrique et le plan des villes américaines est orthogonal
	<Obs, Villes, Vitesses> : les déplacements dans la ville se font plus rapidement en moyenne dans les villes états-uniennes
Hypothèses	<Hyp, Villes, ContrainteSys.> : la croissance de l'économie d'une ville, les évolutions de son porte-feuille de fonctions et des importances relatives de celles-ci se jouent pour une part très importante au niveau du système des villes. Elles constituent pour l'organisation intra-urbaine une contrainte exogène avec laquelle composer
	<Hyp, Villes, Loc.Gen> : les formes des répartitions dans la ville sont le résultat de processus de localisation des acteurs, lesquels recherchent avant tout l'accessibilité, mais aussi des synergies potentielles, le tout sous la contrainte endogène de leur budget, et sous la contrainte exogène de l'espace disponible
	<Hyp, Villes, Culture> : l'étalement urbain résidentiel a toujours été plus fort et le gradient de densité plus faible aux Etats-Unis, parce que les américains préfèrent la campagne
	<Hyp, Villes, Legislation> : la législation américaine et l'importance de la valeur du bien immobilier pour les ménages américains expliquent la tendance persistante à une plus forte clustérisation résidentielle aux E.-U.
	<Hyp, Villes, These> : si les choses se passent comme <Hyp, Villes, Loc.Gen>, selon un contexte <Hyp, Villes, ContraintesSys.> alors les différences de topologie des réseaux (<Obs, Villes, Réseaux>) et de vitesses de déplacement dans la ville (<Obs, Villes, Vitesses>) expliquent les différences dans les schémas de répartition des densités (<Obs, Villes, Densités>), des prix (<Obs, Villes, Prix>), et des activités (<Obs, Villes, Activités>)

TAB. 4 – *Villes*. Observations et hypothèses faites en comparant les formes et les morphogenèses des villes en Europe et aux Etats-Unis.

élémentaires : attraction, répulsion, arbitrage, et contrainte globale. Ce nombre est restreint, et cette catégorisation peut paraître discutable. Nous n'en sommes pas prisonniers : elle propose un cadre permettant de trier et présenter les hypothèses explicatives énoncées littéralement plus-haut. Les règles du jeu d'une modélisation nous imposent une simplification et une mise de côté de spécificités du réel. Bien sûr, pour juger de sa pertinence notre filtrage doit être mis en regard des questions que nous abordons par la modélisation, qui seront énoncées dans la section suivante.

Attraction. Deux cas de figure se présentent :

1. une attraction d'un agent vers une portion de l'espace pour ses qualités naturelles ou d'infrastructures. C'est le cas le plus répandu.
2. une attraction d'un agent pour une portion de l'espace parce que d'autres agents s'y trouvent déjà, et pour les économies urbaines, d'agglomération et d'apprentissage qui résulteraient de leurs interactions potentielles.

Répulsion et inhibition. A l'inverse de l'attraction, certains agents peuvent être repoussés par des portions de l'espace, inter- ou intra-urbain, du fait de leurs caractéristiques de site ou bien du fait de la présence d'autres agents. Dans l'exemple Nîmes-Montpellier donné au premier chapitre, une des raisons de la défiance des entreprises innovantes des TIC envers Nîmes, les ayant amenées à privilégier Montpellier, était son passé industriel et sa forte culture ouvrière. De la même façon, des logiques ségrégatives guident les résidents dans leur choix de logements en essayant, autant que faire se peut, d'éviter les quartiers proches de zones industrielles polluantes, peu garnies en services de proximité, et à faible accessibilité.

On peut parfois appeler « répulsion » l'attraction vers le complémentaire de ce qui repousse. Dans le cas de l'hypothèse d'une préférence culturelle des américains pour la campagne, les ménages qui déménagent en banlieue sont-ils attirés par la campagne, ou bien repoussés par le centre-ville ? Il est en effet plus facile d'exprimer une attirance vers un objet par une répulsion envers tout ce que n'est pas l'objet (le centre-ville), quand cet objet est mal défini positivement (la campagne).

Contrainte globale. Nous distinguons deux types de contraintes globales :

- les contraintes « réelles », qui correspondent à une ressource limitée. L'attribution de cette ressource peut se faire :
 - par des acteurs institutionnels qui contrôlent cette ressource et commandent sa répartition. Par exemple : contrainte internationale imposant une capitale unique par pays, choix des six *villes nouvelles* de la région parisienne lors du plan de décentralisation, etc.
 - par la compétition : concurrence des agents pour l'espace, pour un marché ;
- les contraintes « constatées ». Dans ce cas il existe un processus génératif et collectif sous-jacent, mais :
 - soit on ne dispose pas d'un mécanisme réductionniste satisfaisant permettant d'en rendre compte, et faute de mieux on le modélise par l'imposition d'une contrainte de volume.
 - soit on ne cherche pas à expliquer ce processus aboutissant à cette contrainte, et on l'intègre dans le modèle comme une contrainte globale imposée.

Ces processus faisant intervenir un contrôle global articulent plusieurs niveaux d'organisation. Cela rend difficile leur mécanisation réaliste par une approche purement locale. Nous en avons rencontré dans les modèles présentés dans le chapitre 2, qui intègrent simultanément ces trois types de mécanismes (attraction, inhibition, contrainte globale). Par exemple dans l'AC contraint de [WE93], chaque pas de temps commence par le calcul global de la croissance des effectifs des différentes utilisations du sol au moyen d'un système d'équations différentielles. Ces effectifs calculés sont ensuite ventilés dans un espace discrétisé dont les unités spatiales sont différenciées sur la base d'indicateurs calculés localement. La ventilation de cette ressource indivisible (on ne peut ventiler ni plus ni moins que l'effectif calculé) se fait ensuite suivant un processus de compétition sous contrainte, qui intègre des attractions et des répulsions entre les entités ventilées et les unités spatiales en compétition.

Ces mécanismes sous contrainte constituent à notre connaissance une spécificité forte des modèles de morphogenèse sociale par rapport aux modèles de morphogenèse biologique [BL⁺06]. Simuler le développement d'un système social sur une période historique ne peut se faire sans considérer l'évolution du *contexte*. Il est en effet difficile de faire l'hypothèse qu'il existe des « constantes sociales » sur toute la durée du développement simulé, comme il existe des constantes physiques. Quand la durée abordée est grande, il est insignifiant de définir des valeurs de paramètres à l'instant initial qui restent constantes sur toute la durée de simulation. Ces paramètres prennent alors des valeurs commandées et évolutives.

Arbitrage (et optimisation ?) Parler d'optimisation en territoire géographique est aventureux et il nous faut préciser. Nous devons distinguer plusieurs types de processus : pour l'entreprise qui choisit ses locaux ou pour le ménage qui choisit son nouveau logement, le choix fait au final est rationnel et optimisé au sens de la fonction d'utilité que s'est fixé l'acteur *a priori*, et de l'information dont il dispose (qui peut être imparfaite). Dans ce cas l'optimisation est intentionnelle, elle est la conséquence de la rationalité de l'acteur. Pour autant, lorsqu'il est multi-critères, un problème d'optimisation n'admet généralement pas de solution unique dominant toutes les autres, mais un ensemble de solutions non-dominées.

En revanche il y a légitimement une réticence à intégrer des mécanismes mimant des choix optimisés dans les modèles en géographie, dès lors que soit les entités modélisées sont des agrégats, soit que le modèle ne se réduit pas à une fonctionnalité, soit encore parce que la dynamique du système est ouverte. Nous ne pouvons pas appliquer le raisonnement économique optimisateur à des entités collectives, dont les comportements nous sont connus par des observations de nature statistique. Lorsque nous modélisons des entités territoriales et collectives comme des villes et des fonctions urbaines, nous devons assumer que le raisonnement relatif au comportement de ces « agents » ne peut être que très partiellement congruent à celui employé dans des modèles dont les agents sont des individus qui ont une utilité à optimiser.

Ceci étant dit, il existe aussi des processus qui peuvent être interprétés par l'observateur extérieur comme optimisés *a posteriori* de leur réalisation, et qui ne sont pas nécessairement intentionnels (pas de fonction d'utilité explicitement définie, pas d'agent qui prend une décision, pas d'information parfaite, etc.). On peut alors trouver un mécanisme génératif « aveugle », non intentionnel, qui le reconstruit. Les algorithmes génétiques sont un exemple de méthode d'optimisation « aveugle ».

Le tableau 5 propose une première lecture des processus générateurs hypothétiques de la section 3 à l'aide des quatre grands types de comportements et phénomènes mentionnés.

<p>Processus de la théorie évolutionnaire urbaine</p>	<p>Attraction :</p> <ul style="list-style-type: none">• des fonctions innovantes vers des villes, du fait de leur situation géographique, de leur taille• des fonctions innovantes vers des villes du fait des autres fonctions qui y sont déjà installées• des fonctions centrales en priorité pour les villes les plus grandes <p>Répulsion :</p> <ul style="list-style-type: none">• des fonctions administratives envers les villes situées dans le périmètre d'une ville possédant déjà cette fonction <p>Contrainte globale :</p> <ul style="list-style-type: none">• dans les marchés d'échanges, les villes offrantes répartissent leur production parmi leur réseau de villes clientes. Les volumes sont contraints et peuvent laisser des demandes insatisfaites de villes clientes <p>Arbitrage :</p> <ul style="list-style-type: none">• dans les marchés des fonctions innovantes, les villes offrantes répartissent inégalement leur production parmi leurs clientes, en favorisant les plus anciennes ;• dans une itération, les échanges se poursuivent jusqu'à épuisement de l'offre ou de la demande ;• d'une itération à l'autre, les effectifs des fonctions sont ajustés pour satisfaire exactement la demande insatisfaite, ou au contraire annuler l'offre superflue.
<p>Processus des théories géographiques intra-urbaines et d'économie spatiale</p> <p><Hyp, Villes, Loc.Gen> et</p> <p><Hyp, Villes, ContraintesSys.> : les formes des répartitions dans la ville et ses quartiers sont le résultat de processus de localisation des acteurs, lesquels recherchent avant tout l'accessibilité, mais aussi des synergies potentielles, le tout sous la contrainte endogène de leur budget, et sous la contrainte exogène de l'espace disponible</p>	<p>Attraction :</p> <ul style="list-style-type: none">• des activités et du résidentiel vers les localisations les plus accessibles• des activités vers d'autres activités (synergies, économies d'agglomération) <p>Répulsion :</p> <ul style="list-style-type: none">• des activités envers d'autres activités (résidentiel et services haut de gamme envers industrie lourde, par exemple) <p>Contrainte globale :</p> <ul style="list-style-type: none">• les effectifs des différentes activités à chaque pas de temps doivent être localisés dans la ville, sous contraintes de budgets• l'espace est limitant : les quartiers de la ville ont des capacités d'occupation finies en terme de bâti
<p><Hyp, Villes, Culture> : l'étalement urbain résidentiel a toujours été plus fort et le gradient de densité plus faible aux Etats-Unis, parce que les américains préfèrent la campagne</p> <p><Hyp, Villes, Legislation> : la législation américaine et l'importance de la valeur du bien immobilier pour les ménages aux E.-U. expliquent la tendance persistante à un plus fort zonage résidentiel aux E.-U.</p>	<p>Attraction :</p> <ul style="list-style-type: none">• du résidentiel riche envers les quartiers éloignés du centre <p>Répulsion :</p> <ul style="list-style-type: none">• du résidentiel riche envers du résidentiel pauvre (ségrégation) et entre résidentiel et activités (que ce soit de l'industrie périphérique ou du CBD central)

TAB. 5 – Reformulation de certaines des observations et hypothèses exprimées au sujet des formes et morphogenèses (cf. tableaux 3 et 4) à l'aide de quatre grands type de processus.

4 Questions abordées par simulation

Dans la section précédente, nous avons listé plusieurs hypothèses faites par les géographes pour expliquer les constats rapportés dans la section 2 de ce chapitre. L'objectif de ce travail collaboratif associant géographes et informaticiens est de mettre certaines de ces hypothèses à l'épreuve de la simulation informatique. A notre connaissance une étude à la fois *in silico*, comparative, et à plusieurs niveaux d'organisation, des morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis n'a jamais été faite.

De même que pour les observations (section 2) et les explications avancées (section 3), nous distinguons les hypothèses à tester pour le système des villes, de celles à tester pour la ville. **Au niveau du système de villes**, les mécanismes génériques intégrés à la théorie évolutionnaire urbaine permettent-ils de reproduire la taille de la population, et la hiérarchie urbaine de chacun des systèmes étudiés ?

$$\langle \text{Hyp, SVilles, TheoEvol} \rangle \implies \langle \text{Obs, SVilles, H1} \rangle \ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, H2} \rangle \quad (3.1)$$

Si non, leur adjoindre les différences observées en terme de technologies de transport, de modes de colonisation de l'espace, de sites des ressources et d'ouverture internationale, serait-il suffisant pour générer ces propriétés émergentes et cette différenciation ?

$$\begin{aligned} &\langle \text{Hyp, SVilles, Theo.Evol} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, Colo.Spatiale} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, Gisements} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, Ports} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, Transports} \rangle \\ &\implies \langle \text{Obs, SVilles, H1} \rangle \ \& \ \langle \text{Obs, SVilles, H2} \rangle \quad (3.2) \end{aligned}$$

Au niveau des villes, l'hypothèse que nous souhaitons tester avant tout est de savoir si les *différences géométriques* existant entre ces villes suffisent à expliquer les *différences dans les répartitions spatiales* ? Jusqu'à quel point le réseau peut-il être considéré comme responsable de la production des formes de répartition des activités, des densités et des prix ? L'une des deux formes géométriques est-elle, par essence, plus sujette à générer de l'étalement urbain ? Exprimée à l'aide des étiquettes introduites dans les sections précédentes, cela revient à se demander si l'on peut, par la simulation, vérifier l'implication :

$$\begin{aligned} &\langle \text{Hyp,Villes,LocGen} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs,Villes,Réseaux} \rangle \\ &\ \& \ \langle \text{Obs,Villes,Vitesses} \rangle \\ &\implies \\ &\ \langle \text{Obs,Villes,Densités} \rangle \ \& \ \langle \text{Obs,Villes,Prix} \rangle \ \& \ \langle \text{Obs,Villes,Activités} \rangle \\ &\quad (3.3) \end{aligned}$$

Nous avons vu que d'autres hypothèses sont également invoquées pour expliquer les différences d'organisation interne des villes. Si nous ne pouvons pas montrer cette implication, nous pouvons

essayer d'injecter plus de connaissances dans les mécanismes, en y intégrant des différences institutionnelles et culturelles. Pourrait-on alors prouver, en faisant intervenir ces autres facteurs, l'implication (plus faible) :

$$\begin{aligned}
 &<\mathbf{Hyp}, \mathbf{Villes}, \mathbf{LocGen}> \\
 &\quad \& \quad <\mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Réseaux}> \\
 &\quad \& \quad <\mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Vitesses}> \\
 &\quad \& \quad <\mathbf{Hyp}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Legislation}> \\
 &\quad \& \quad <\mathbf{Hyp}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Culture}> \\
 &\implies \\
 &\quad <\mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Densités}> \quad \& \quad <\mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Prix}> \quad \& \quad <\mathbf{Obs}, \mathbf{Villes}, \mathbf{Activités}>
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

L'originalité de notre approche tient à la volonté d'étudier cette causalité par une modélisation quantitative : peut-on concevoir un modèle de développement spatio-temporel de ville qui soit générique, cohérent avec la littérature géographique et celle d'économie spatiale, et qui, en fonction de la structure de l'espace sur laquelle il s'exécute, produirait des formes d'organisation intra-urbaine différenciées ?

Enfin **au niveau du système urbain dans son ensemble**, nous souhaitons aussi poser le problème, dans ce cadre formalisé, des relations entre la morphologie de la ville, sa « performance spatiale », et sa situation relative dans le système des villes. Peut-on établir une ontologie multi-niveaux en ce qu'elle articulerait les niveaux, habituellement dissociés en modélisation (cf. chapitre 2), de l'intra- et de l'inter-urbain ? Quelles hypothèses quantifiées peut-on faire pour lier ces trois niveaux d'organisation que sont celui des quartiers, celui de la ville et celui du système des villes ?

Les questions que nous venons d'énoncer relatives aux systèmes de villes (inter-urbain) seront étudiées dans le chapitre 4, celles relatives aux villes (intra-urbain) dans le chapitre 5, celles relatives à l'articulation de l'inter et de l'intra-urbain dans le chapitre 6.

5 Méthodologie

Les objectifs que nous venons d'énoncer posent de nombreux problèmes méthodologiques, qui tiennent à la fois :

1. aux données nécessaires à la mise en œuvre ;
2. aux techniques informatiques à mettre en œuvre pour :
 - (a) concevoir les modèles ;
 - (b) les coder ;
 - (c) les exploiter ;
 - (d) les documenter ;
3. à l'évaluation de ces modèles.

5.1 Les données

Reconstruire la genèse urbaine sur le long-terme suppose de disposer de données harmonisées et fiables sur l'histoire de ces systèmes urbains. Les données nécessaires sont de deux types :

- des données pour « nourrir » le modèle : elles servent à construire des configurations initiales et paramétrer les processus modélisés, en cohérence avec le contexte historique et géographique ;
- des données à confronter aux sorties du modèle : quand on met à l'épreuve des hypothèses explicatives de morphogenèse, un critère nécessaire d'évaluation est leur capacité à produire des sorties semblables aux données historiques dont on dispose sur le phénomène que l'on cherche à reproduire.

5.1.1 Origine des données

La réflexion sur des définitions harmonisées des villes, qui soient évolutives dans le temps et qui permettent la comparaison d'un pays ou d'un continent à l'autre, ainsi que la constitution de tels corpus de données est l'un des axes de recherches de l'équipe P.A.R.I.S de l'UMR Géographie-Cités. Nous l'avons illustré dans la section 2 du premier chapitre, le raisonnement sur les trajectoires des villes dans le temps requiert une délimitation spatiale évolutive des villes, qui aille au-delà de l'arbitraire définition administrative. Cette délimitation doit tenir compte de « l'évolution de l'espace des interactions durant ces deux derniers siècles » [BP10]. Comme le synthétisent Bretagnolle et Pumain :

« la ville est une entité collective dotée d'une puissance de développement extrêmement forte depuis la révolution de l'industrie et des transports, dont on mesure les retombées à la fois sur le plan démographique et en termes de consommation d'espace : entre 1800 et 2000, la population urbaine maximale observée à l'échelle du monde a été multipliée par 30 et la surface des grandes villes par 100 [...] L'utilisation de bases de données sur les villes mises à la disposition des chercheurs par les organismes de recensement peut conduire à des analyses erronées, en minorant la portée de l'extension des villes dans l'espace. »

Dans le cas des Etats-Unis, la ville définie officiellement jusqu'en 1950 correspond exactement à la municipalité politique (appelée *city* ou *town*, selon les Etats). Cela pose problème car cette délimitation territoriale ignore « le développement massif des banlieues à la fin du 19^{ème} siècle et sous-estime donc largement la croissance des plus grandes villes ».

A. Bretagnolle, T. Giraud et H. Mathian ont constitué ces dernières années une base de données des villes états-uniennes de 1790 à 2000 avec l'objectif de recenser leurs populations dans un référentiel spatio-temporel cohérent et évolutif [BGM08]. Cette base s'appuie sur des définitions morphologique et fonctionnelle de la ville (cf. chapitre 2 section 2), et tient compte de l'évolution des distances significatives, en relation avec l'évolution des technologies de transport urbain. A. Bretagnolle synthétise ainsi la construction de cette base :

« Nous avons utilisé la totalité des recensements de population (un tous les 10 ans) et reconstruit, à chaque date, une délimitation spatiale appropriée des villes : de 1790 à 1870, les villes sont de simples municipalités, puis nous les définissons comme des agglomérations, en regroupant au moyen d'un critère de distance-temps d'une heure les municipalités localisées à portée d'une plus grande. À partir de 1940, nous utilisons la délimitation des aires fonctionnelles, fondée sur les navettes domicile-travail » [BP10]

Pour les villes européennes, les bases de données utilisées sont celles qui définissent des agglomérations de plus de 10 000 habitants. Elles ont été construites par Paul Bairoch et ses collaborateurs [BBC88] et François Moriconi-Ebrard [ME93].

Sélection et composition de données. Nous disposons donc de données harmonisées sur les populations des villes aux Etats-Unis et en Europe entre 1800 et 2000. Pour le niveau des systèmes de villes, l'intégralité des villes présentes dans la base sont nécessaires. La description des villes par leur seule population harmonisée à chaque date est suffisante pour les hypothèses que nous souhaitons étudier par la simulation.

En revanche pour les questions relatives aux formes de villes, d'autres données sont nécessaires *a priori* : mesures de densités et de prix du foncier dans les villes, cartes des utilisations du sol considérées, importances des activités urbaines considérées notamment, le tout à différentes dates de la période 1800-2000. A notre connaissance il n'existe pas actuellement de bases recensant ces données fines, et donc pas de sources accessibles *a fortiori*. L'acquisition de ces données, leur tri et leur harmonisation, sans parler de coût monétaire, ont un coût-temps prohibitif. En accord avec les géographes, nous avons opté pour la définition de deux profils-types moyens et historiques, respectivement d'une ville européenne et d'une ville états-unienne moyennes. Ces profils sont établis par les géographes à partir des sources disponibles dans la littérature géographique, complétée par leur expertise et intuition.

Pour définir ces profils-types, considérer l'ensemble des villes de chacun des continents est problématique. Quoi de commun entre une ville de plus de dix millions d'habitants et une ville de quelques milliers ? Pour que ces deux profils de « ville-moyenne » des deux continents gardent une certaine cohérence, un filtrage sur les données est nécessaire pour sélectionner une partie seulement des villes des deux bases dont nous disposons.

Définition de profils fonctionnels historiques pour des villes-types. Nous décidons de nous restreindre aux seules villes entre un et trois millions d'habitants dans les deux continents. Il nous faut établir des profils fonctionnels de ces villes pour la période historique considérée : quelle était en moyenne la population de ces villes entre 1800 et 2000 tous les dix ans, quelles étaient les activités économiques localisées dans les villes de cette taille aux différentes périodes, et comment la population active se répartissait-elle dans les différents types d'activités installées dans ces villes ? Comment se répartissait la population résidentielle, quels étaient leurs écarts de pouvoir d'achat ? Les réponses à ces questions nous seront nécessaires. Nous verrons dans le chapitre 5 la solution retenue.

5.2 Quelles simulations ?

Un projet pluri-disciplinaire de simulation amène des questions informatiques systématiques, quelque soient les autres disciplines impliquées. Nous listons certaines de ces questions, nous essaierons de leur apporter des réponses dans les chapitres suivants, centrés sur les modèles, les outils réalisés et les expérimentations. Pour chaque groupe de questions nous décrivons en quelques phrases les enjeux. Ces questions sont associées à toutes les phases classiques d'un projet informatique :

- **Conception** : quel style de simulation pour tester les hypothèses géographiques isolées ?
- **Réalisation** : quels langages et quelles bibliothèques pour coder les modèles ? Combien va « coûter » une simulation et quel matériel est nécessaire pour faire tourner les modèles construits ?

- **Expérimentation** : quels outils pour exploiter et expérimenter collectivement sur le modèle ? Les géographes pourront-ils être autonomes lors de l'expérimentation, ou faudra-t-il assurer un suivi ? Combien de simulations faudra-t-il faire ?
- **Évaluation et calibrage** : comment systématiser l'évaluation des résultats ? Comment systématiser le calibrage des modèles construits ?
- **Validation** : comment faire valider les réalisations par les géographes ?
- **Documentation et Communication** : quelles normes suivre pour documenter ces modèles ? Comment les communiquer entre membres de l'équipe, et de l'équipe vers l'extérieur ?

5.2.1 Conception

Si l'on peut être réductionniste en principe lorsque l'on « pense » les villes (des individus ont précédé les villes et les ont construites), il paraît indispensable, pour les modéliser, d'acter dès le départ qu'il existe des interactions entre les niveaux, et de prendre le parti de les intégrer également dans les villes et systèmes de villes à reconstruire informatiquement. L'histoire de toutes les villes américaines est pluri-séculaire, celles de très nombreuses villes européennes pluri-millénaire. Très vite après leur établissement, il devient très difficile de démêler ce qui relève du choix autonome de ce qui relève de la contrainte. Les organisations créées sont-elles véritablement autonomes ? Pourrait-on en théorie les reconstruire totalement par des schémas déterministes ? Ces questions n'ont pas d'importance dans le cadre qui est le nôtre : les échelles de temps et d'espace abordées, l'ambition d'une comparaison des morphogenèses, son évaluation en la comparant aux données historiques, tout cela nous impose d'intégrer le contexte historique et démographique. Intégrer l'évolution de celui-ci dans le modèle nous obligera à faire de la simulation « guidée par le contexte », différente de la simulation classique « from scratch », ainsi qu'à regarder l'intégralité de la trajectoire simulée, et pas seulement la configuration finale. La figure 3.7 illustre ce positionnement.

Pour les deux niveaux, nous suivrons une même démarche comparative et appuyée sur des principes de *parcimonie* (construction d'un modèle que nous garderons générique aussi longtemps que possible) et d'*incrémentalité* (une seule observation en plus à chaque ajout). Peut-on aboutir au résultat en gardant la même liste d'opérateurs et en changeant uniquement les paramètres, ou bien doit-on ajouter de nouveaux opérateurs spécifiques ? Dans ces systèmes urbains, jusqu'à quel point le contexte spatial et démographique détermine-t-il les formes prises par les sociétés urbaines, toutes choses égales par ailleurs ? A partir de quand faut-il introduire des processus économiques, historiques, culturels, législatifs spécifiques à chacun ? Pour les deux niveaux, on partira donc d'un modèle unique capable de s'exécuter sur des espaces géographiques différents, que l'on pourra ensuite particulariser en des modèles instanciés propres à chaque continent.

5.2.2 Réalisation et expérimentation

Les langages à objets sont « naturellement » utilisés pour implémenter les modèles à base d'agents [DVM02]. Les bibliothèques logicielles pour la simulation agent comme *Swarm*, *Repast*, *Cormas*, *Madkit*, etc. offrent des structures de données minimales, notamment spatiales, et des structures de contrôle (ordonnanceurs, protocoles de communication entre agents) sur lesquelles construire [TDZ08, CC06, RLJ06].

Les modèles présentés dans la suite ont été développés en s'inspirant de l'« esprit » de *Simpop1*, que nous avons mentionné dans la section 4 du chapitre 2. *SIMPOP1* [BGPM⁺96] a été implémenté en *Smalltalk*, langage orienté objets supportant du typage et de la distribution de messages dynamiques, des capacités réflexives, et qui disposait d'une bibliothèque graphique intéressante pour

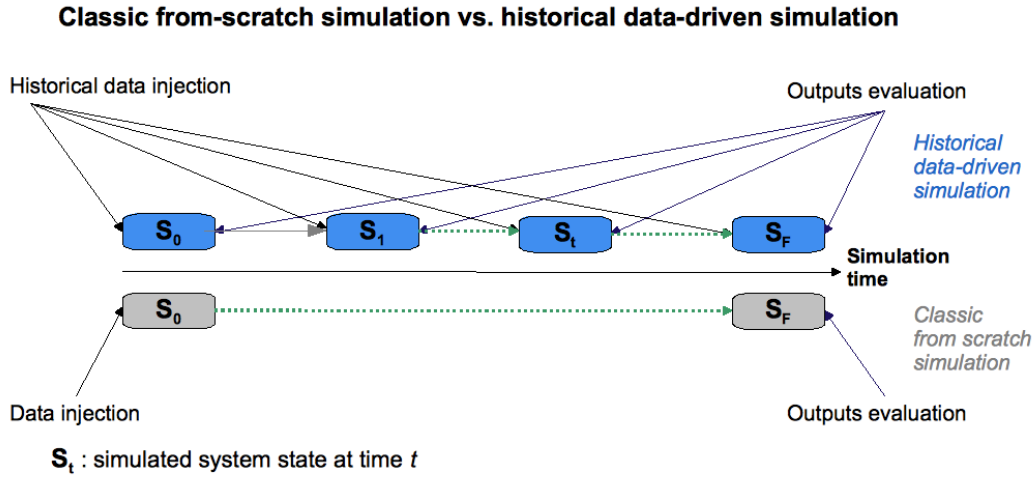


FIG. 3.7 – Illustration des différences entre une approche *from scratch* et une approche *data driven*. Dans le premier cas (ligne du bas), les valeurs des paramètres du modèle simulé sont définies à l’instant initial et sont constantes sur toute la durée simulée. Lorsque l’on modélise des dynamiques sociales de long-terme, on ne peut pas supposer qu’il existe des « constantes sociales » à l’image des constantes physiques, et l’on doit tenir compte de l’évolution du contexte. Dans une approche guidée par les données (ligne du haut), les paramètres prennent des valeurs évolutives qui sont mises à jour pendant la simulation. La figure illustre également la différence entre l’évaluation d’un *développement*, où les sorties du modèle doivent être comparées aux données à chaque étape (ligne du haut), et l’évaluation d’une situation finale uniquement.

les visualisations des simulations. Il a été important dans les communautés IA et SMA, en France notamment où plusieurs applications historiques de simulation multi-agents l’ont utilisé (*Manta* [Dro93], *SimDelta* [Cam94]). Pour les modèles présentés dans la suite le choix s’est porté sur Objective-C, langage qui reprend la même philosophie que Smalltalk [CL09, Dun03]. Ce choix a surtout été guidé par la volonté de s’appuyer sur Swarm qui offre un méta-modèle structurel hiérarchique et récursif qui le rend *a priori* particulièrement adapté à la conception de modèles multi-niveaux de systèmes complexes [MBLA96]. Au delà de l’utilisation de Swarm, Objective-C en lui-même est intéressant pour faire de la simulation entité-centrée multi-plateforme et également du point de vue des performances [Dun03]. Comme C++ il est dérivé du C, auquel il rajoute une couche objet. Un programme écrit en Objective-C peut donc contenir du code C et s’appuyer sur des bibliothèques C « pur ». Nous verrons dans le chapitre 4 (section 2.1) comment les constructions du langage ont été mises à profit pour programmer des agents-villes.

Concernant l’expérimentation, faut-il développer des outils ad-hoc et indépendants, ou bien

s'appuyer sur les outils maîtrisés par les experts ? Peut-on se baser sur une seule simulation « réussie » pour valider les hypothèses testées ? A partir de combien de simulations peut-on considérer qu'on en a fait suffisamment ? Faut-il paralléliser le calcul ? Nous verrons les réponses apportées à toutes ces questions pour chacun des modèles dans les chapitres 4 et 5.

5.2.3 Validation

Il est souvent dit que l'écueil des modèles à base d'agents est leur *validation*. Cet écueil n'est pas celui spécifiquement des systèmes et de la simulation multi-agents, mais plus généralement celui des approches de modélisation fines, fortement paramétrées et par principe calculatoires. Il existe une littérature abondante et déjà relativement ancienne [Sar79, Bal98] sur la question de la validité d'un programme de simulation. En général une distinction est faite entre le terme « validation » (s'assurer que les mécanismes du modèle sont fidèles aux connaissances du domaine, ce qui est résumé par Balci en la formule « *build the right model* » [Bal98]) du terme « vérification » (le code est aligné sur les spécifications du modèle, soit « *build the model right* » toujours selon Balci).

En modélisation et simulation à base d'agents dans un cadre interdisciplinaire, une littérature assez riche s'est développée sur le cycle de développement des modèles, fait d'allers-retours entre les différents partenaires (expert, modélisateur et codeur)[Meu04]. Nous ne développons pas ces aspects, qui sont toutefois indispensables au succès d'un projet de modélisation. Nous pensons que cette réflexion est à rattacher à celle qui est développée dans l'ingénierie logicielle, où la théorisation sur les processus de développement de logiciel se fait depuis longtemps [TRC84, PI87, Hum90, BRJ99, AJ02]. B. Glisse a développé dans sa thèse une comparaison entre les cycles de développement classiques observés dans l'industrie et les services informatiques et ceux d'un projet de recherches impliquant géographes et informaticiens [Gli07]. T. Meurisse a proposé une classification dans cette famille de modèles successifs dans un projet inter-disciplinaire de simulation [Meu04].

Pour d'autres [ARB06], il faut substituer au principe de validation, trop binaire (un modèle serait valide ou invalide), le principe d'évaluation, plus continu. L'évaluation d'un modèle consiste à vérifier son respect d'un nombre fini de critères. Un critère peut être booléen (le modèle remplit ou non ce critère) ou plus continu (le modèle a une mesure de performance sur ce critère). Une évaluation complète du modèle consiste à cumuler les performances du modèle sur les différents critères retenus. Une évaluation parfaite (le modèle répond de façon optimale sur tous les critères) correspond alors à la validation, au sens donné par la personne ayant conçu le protocole de test (d'évaluation). Une évaluation incomplète ne signifie pas que le modèle est « à jeter », mais que sur certains aspects retenus comme indispensables pour une validation complète, il n'est pas encore performant.

La validation encapsule donc plusieurs sous-problèmes qu'il faut démêler, entre ceux qui relèvent de l'« épistémologie dans une coquille de noix » [VP06] de ceux qui peuvent être solutionnés par un effort technique, pour lequel l'informaticien peut et doit chercher à amener de la systématique. L'évaluation de la qualité des sorties et le calibrage en font partie.

5.2.4 Évaluation et calibrage

De nombreux points de vue peuvent co-exister sur ce qui fait d'une simulation une « bonne » simulation. La définition de la qualité d'une simulation est toujours dépendante des objectifs assignés au modèle, et ceux-ci peuvent être très variés [Var07]. Dans l'absolu, la somme d'informations apportées par chaque simulation est identique : on peut voir un modèle comme un

mur sur lequel on lancerait une balle ; la façon dont la balle nous revient nous apprend toujours quelque chose sur la surface de ce mur. Pourtant, certaines simulations sont plus utiles que d'autres lorsque l'objectif est de *calibrer* le modèle.

Dans ce cas, la qualité est généralement synonyme de capacité à générer des structures urbaines virtuelles qui puissent être considérées comme réalistes par l'expert, relativement au phénomène étudié. Mais dans une approche comparative comme la nôtre, appuyée sur un modèle générique unique dont on cherche ensuite des spécialisations minimales permettant de reproduire des différences observées, la qualité d'un paramétrage peut être synonyme de capacité à produire des structures simulées bien différenciées selon le paramétrage, et ce indépendamment des valeurs absolues des variables de sortie, et de leur écart avec les valeurs de référence pour les structures réelles.

Dans tous les cas, l'objectif est d'amener autant de structuration et de systématisation dans le travail avec le modèle et dans son évaluation que ce que la conception elle-même du modèle apporte comme systématisation et formalisation dans les connaissances et le raisonnement.

Lorsque l'expérimentation correspond à une démarche de calibrage, une idée est de se baser sur des scores à définir avec les experts, et d'orienter l'expérimentation de façon à les maximiser. Ces scores peuvent être multiples et associés plusieurs niveaux d'observation sur le modèle, à plusieurs points de vue. En quantifiant la qualité d'une simulation à travers des scores qu'on cherche ensuite à maximiser, on ramène le problème du calibrage à un problème d'optimisation, pour lequel on dispose de savoirs-faire techniques.

5.2.5 Documentation et communication

Pour de multiples raisons, le déroulement d'un programme de simulation dans un contexte de recherche pluridisciplinaire est loin d'être linéaire. Nous en retiendrons trois importantes :

1. au fur et à mesure de l'obtention de résultats encourageants, les participants nourrissent de nouvelles ambitions pour le modèle, et les délimitations initiales du projet sont élargies. L'arbitrage entre l'ajout de nouveaux comportements (pour reproduire une palette étendue de phénomènes) et la documentation détaillée des comportements existants se fait par exemple souvent dans le sens de l'ajout. La complexification peut être mal contrôlée. Le nombre de lignes de codes ajoutées n'est en aucun cas un indicateur informatif de la complexité supplémentaire introduite.
2. un développeur, plus encore lorsqu'il travaille seul, ne s'impose pas nécessairement la discipline de documenter le code écrit. Cette absence de documentation n'est pas nuisible à court terme, mais très pénalisante à long terme. L'optimisation non documentée d'un code source rend sa reprise très coûteuse en temps pour les développeurs intégrant le projet par la suite.
3. les gros projets de simulation se développent sur plusieurs années et peuvent contenir des périodes de « creux ».

Ces constats nous amènent à conclure que :

- Lorsque le temps de réponse n'est pas un critère déterminant, le code écrit doit privilégier la lisibilité à la performance, et son écriture doit suivre des *guidelines*⁸. Un code propre et documenté a également l'avantage qu'il devient bien moins utile de le doubler d'une documentation proche de l'implémentation (algorithmes en pseudo-code), ou du moins celle-ci peut-être partiellement générée automatiquement.

⁸guide établissant des normes et des codes de bonne pratique de programmation ayant pour but de faciliter le développement collaboratif des logiciels.

- Que les participants changent ou non, il reste crucial de constituer et maintenir une documentation à plusieurs niveaux de réflexion, indispensable pour redémarrer après une coupure.

Comme pour le code, lorsque la documentation est éditée à plusieurs dans une équipe, si sa diffusion après une modification requiert une action spécifique (envoi de mail, mise à jour sur serveur), un oubli de l'un des membres entraîne la coexistence de versions concurrentes et incomplètes. En outre, sans outil adapté il est fastidieux de garder trace de ses versions successives et des choix effectués. La professionnalisation de la pratique de la simulation en géographie requiert la mise en place d'outils adaptés (CVS, wikis) pour régler ces problèmes classiques de gestion de projet informatique.

Chapitre 4

Simuler les morphogenèses des systèmes de villes

1	Préambule : entrée dans le projet Simpop2 et calendrier des réalisations	101
2	Aspects informatiques de Simpop2	104
2.1	Le programme multi-agent	105
2.2	Fonctions urbaines et modélisation de l'innovation	112
2.3	Les applications	114
3	Expérimentations avec l'application Europe	115
3.1	Situation initiale de référence	115
3.2	Résultats	115
3.3	Vers une expérimentation comparative Europe <i>vs.</i> Etats-Unis	116
4	Mécanismes spécifiques pour l'application Etats-Unis	118
4.1	Des <i>dictionnaires imbriqués</i> pour la simulation historique	118
4.2	Ouvrir le système : fonction urbaine « mondiale »	120
5	Expérimentations avec l'application Etats-Unis, et généralisation	122
5.1	Situation initiale de référence	122
5.2	Résultats	122
5.3	Généralisation des mécanismes implantés	123
6	Outils d'exploitation existants	125
6.1	Définitions préalables	125
6.2	Architecture logicielle et fonctionnalités	125
6.3	Limites	129
6.4	Besoin d'outils complémentaires	131
7	Nouveaux outils d'exploitation	131
7.1	Interfaçage avec le SIG	132
7.2	Wiki d'expérimentation	133
7.3	Langage de script pour la composition de rapports	135
7.4	Interfaçage avec des algorithmes de calibrage automatique	139
7.5	Site web	141
7.6	Synthèse des outils développés et articulation	142
8	Conclusions du chapitre	143

Dans le chapitre précédent nous avons identifié les hypothèses formulées par les géographes sur la morphogenèse urbaine en Europe et aux Etats-Unis, qu'ils souhaitent mettre à l'épreuve de la simulation informatique. Nous avons également défini notre méthodologie :

1. Construire d'abord des modèles qui contiennent uniquement les mécanismes correspondant aux processus supposés génériques, et inclus dans les théories sur lesquelles s'appuient les hypothèses à tester. Ces modèles doivent toutefois pouvoir être paramétrés pour ce qui relève de l'espace et des contextes historique, démographique comme économique, que les théories urbaines ne cherchent pas à expliquer formellement.
2. Évaluer jusqu'à quel point ces processus génériques mécanisés sont suffisants pour reproduire les propriétés émergentes observées.
3. Instancier si besoin ce modèle générique en modèles séparés, auxquels nous ajoutons alors les processus spécifiques de la morphogenèse urbaine de chacun des continents.

Nous avons enfin vu dans la dernière section du précédent chapitre que cette approche par la simulation pose des questions à toutes les étapes du projet, auxquelles il nous faudrait imaginer des réponses pour chacune des applications développées.

Dans ce troisième chapitre nous focalisons sur les réalisations associées à la vérification des hypothèses formulées au sujet de la morphogenèse des systèmes de villes. Les sections 2, 3 et 6 présentent des réalisations déjà existantes avant le démarrage de la thèse, mais qui pour certaines n'avaient jamais été documentées. Les sections 5, 4 et 7 décrivent notre contribution.

En préambule nous rappelons le contexte de notre entrée dans le projet *Simpop2* du laboratoire Géographie-Cités, et nous énumérons tout ce qui avait déjà été fait au début de ce travail.

La section 2 décrit quelques aspects saillants du programme informatique implantant le modèle à base d'agents *Simpop2*. Elle propose un éclairage sur la notion géographique de *fonction urbaine*, sur la façon dont elle est réifiée dans le programme. Enfin cette section liste les applications de *Simpop2*. Cette section propose une description détaillée de l'architecture logicielle de *Simpop2*, description qui n'existait pas jusqu'à présent.

La section 3 synthétise les résultats obtenus lors d'une première campagne d'expérimentation avec l'application Europe long-terme. Elle se termine par les résultats obtenus lorsque le modèle, en l'état et avec le paramétrage arrêté lors du calibrage de l'application Europe, est exécuté sur l'espace nord-américain.

La section 4 décrit les structures de données et mécanismes implémentés pour traduire les observations **<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>**, **<Obs, SVilles, Gisements>** et **<Obs, SVilles, Ports>**, énoncées dans le chapitre 3.

La section 5 synthétise les résultats obtenus lors du test de ces mécanismes sur l'application Etats-Unis. Elle donne des premiers éléments sur la vérification de l'hypothèse principale testée pour les systèmes des villes. Nous illustrons aussi la généralisation possible des classes développées, qui ont été utilisées pour l'application Afrique du Sud.

La section 6 présente les outils qui ont permis l'expérimentation des applications Europe et Etats-Unis, et met en évidence leurs limites.

La section 7 présente les réalisations effectuées¹ dans le but de pouvoir exploiter le modèle générique et ses applications avec des outils complémentaires :

1. l'interfaçage du modèle générique avec des bases de données spatiales pour l'exploitation des différentes applications du modèle depuis un SIG ;
2. le branchement au modèle d'un wiki permettant un suivi collectif et décentralisé de l'expérimentation ;
3. la réalisation d'un langage de script permettant la composition de rapports modulables sur des bases de données ;
4. la réalisation d'une interface graphique permettant de contrôler un processus de calibrage automatique basé sur des algorithmes génétiques² ;
5. la réalisation d'un site web dédié à **Simpop2** et à ses applications.

1 Préambule : entrée dans le projet **Simpop2** et calendrier des réalisations

Notre entrée dans l'équipe P.A.R.I.S du laboratoire Géographie-Cités, qui dirige, conçoit et réalise depuis 1993 les projets **Simpop** successifs, s'est effectuée alors qu'un modèle générique à base d'agents, nommé **Simpop2** (suite de **Simpop1** [BGPM⁺96], et son instanciation en deux applications distinctes, **Eurosim** et **Europe**³ avaient déjà été conçues et implantées. **Simpop2** et ses applications ont été les produits d'une collaboration de quatre ans entre géographes et informaticiens du LIP6.

La thèse de Benoît Glisse [Gli07] est l'un des fruits de ce travail interdisciplinaire. Paradoxalement, peu de place y est consacrée au programme informatique implantant le modèle et ses applications, aux expérimentations et à leurs résultats, ainsi qu'aux outils d'exploitation développés. Pourtant les réalisations logicielles de B. Glisse ont constitué un socle opérationnel sur lequel il a été possible à la fois :

- pour les géographes, d'obtenir des réponses aux questions ayant motivé la mise en route de **Simpop2**. Ces questions incluent celles relatives à la morphogenèse des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis, qui nous intéressent ici, sans se limiter à celles-ci.
- pour nous, d'appuyer la réalisation des deux applications Etats-Unis et Afrique du Sud. Ces réalisations de B. Glisse nous ont en outre servi de point d'ancrage et de source d'inspiration pour la conception d'autres modèles, **simpopNano** et **Simpop3**, qui seront présentés dans les chapitres suivants.

La figure 4.1 présente l'ordre chronologique de réalisation du matériel présenté dans ce chapitre. On peut y voir qu'au démarrage de la thèse, une campagne de simulations sur l'application **Europe** avait déjà été menée conjointement par les géographes et les informaticiens. Les résultats en ont été publiés dans [PSB⁺09]. Certaines des questions sur la portée explicative des processus génériques inclus dans la théorie évolutionnaire urbaine, telles que nous les avons formulées dans le chapitre précédent, *avaient donc déjà été tranchées*.

¹Les implantations correspondantes ont principalement été réalisées par Sébastien Rey-Coyrehourcq de mai à octobre 2009 au cours de son stage final de master 2 Carthageo Pro, que j'ai encadré [Rey09].

²L'implémentation correspondante a été assurée par Alexandre Monzie durant son stage de 2ème année à l'ENSIIE, que j'ai co-encadré avec Guillaume Hutzler.

³ou « Europe long-terme », pour bien la distinguer d'**Eurosim**. Elle est l'une des deux applications auxquelles nous nous intéresserons dans la suite, avec l'application Etats-Unis.

Dans un premier temps, notre travail sur le modèle générique **Simpop2** et ses applications a donc consisté à :

1. Porter le modèle générique sur la géographie états-unienne, formaliser les hypothèses portant sur les spécificités du développement du système des villes états-uniennes, concevoir et réaliser les mécanismes spécifiques traduisant ces hypothèses ;
2. Accompagner l'expérimentation sur l'application Etats-Unis ;
3. Tester les possibilités de généralisation des mécanismes développés en les portant sur un autre terrain géographique, le système des villes sud-africain ;
4. Accompagner l'expérimentation sur cette application Afrique du Sud ;
5. Piloter la réalisation du site Web du projet, qui constitue aujourd'hui la source d'information publique de référence sur le modèle.

Ce n'est que plus tard que notre réflexion sur la nécessaire séparation entre les modèles (qu'ils soient ou non à base d'agents) et leurs outils d'exploitation (qui peuvent être multi-agents également) nous a amené à imaginer et à développer avec Sébastien Rey les réalisations présentées dans la section 7 de ce chapitre.

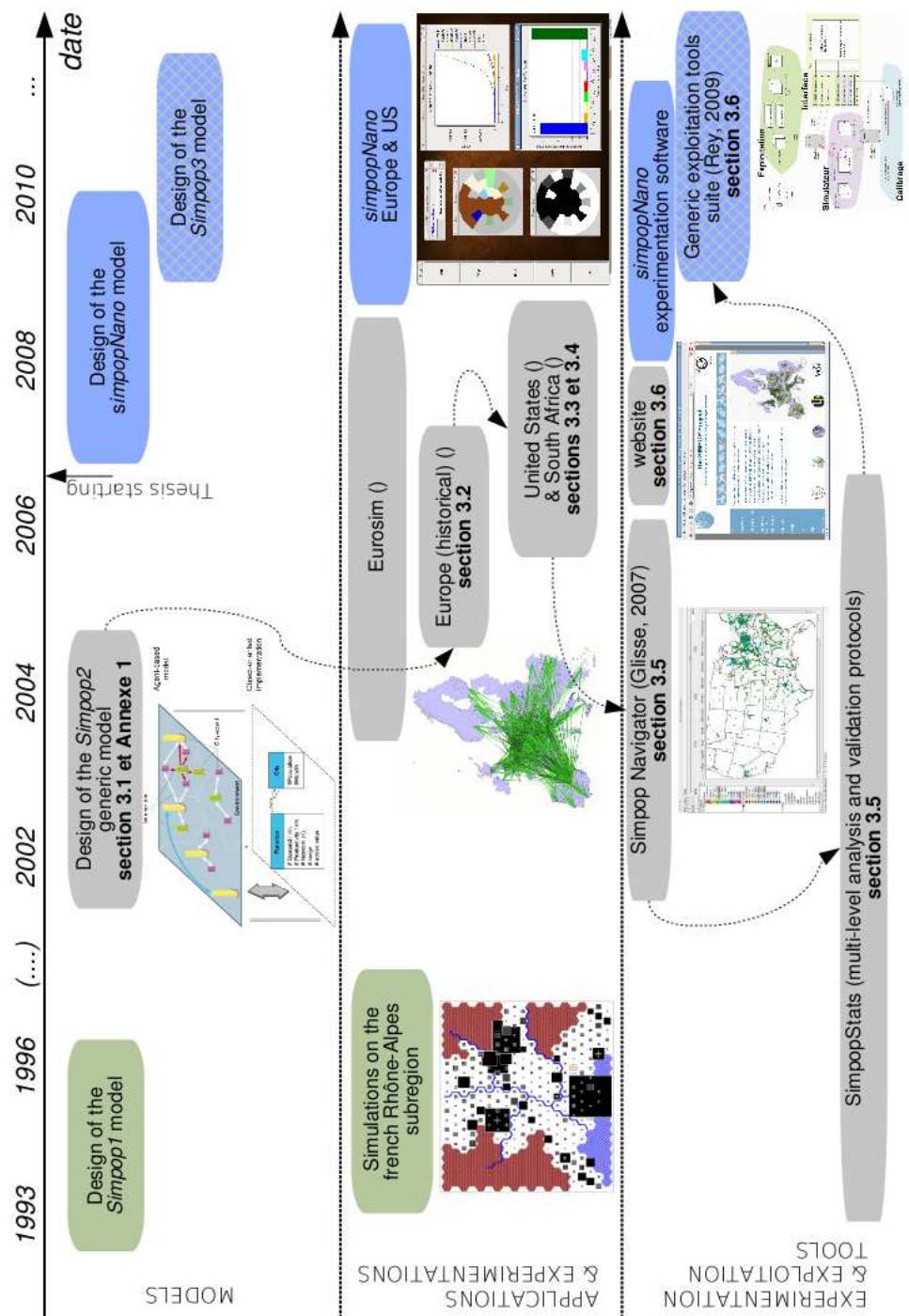


FIG. 4.1 – Chronologie des activités des projets Simpop successifs. Nous avons séparé trois grandes classes de réalisations : les modèles (ligne du haut), leurs applications et les campagnes d'expérimentations auxquelles elles ont donné lieu (ligne du milieu), et enfin les outils d'expérimentation et d'exploitation des modèles et de leurs applications (ligne du bas). La largeur d'un cadre reflète la durée de l'activité. La ligne fléchée en pointillés correspond au parcours proposé par ce chapitre

2 Aspects informatiques de Simpop2

Nous pouvons voir sur la chronologie (figure 4.1) que le projet **Simpop2** était très largement avancé au démarrage de cette thèse. Nous n'avons participé ni à la conception du modèle, ni à la réalisation de la partie générique commune à toutes les applications, ni à celle de l'application Europe dont nous présentons pourtant les résultats dans la suite. Il existe aujourd'hui une documentation abondante sur **Simpop2** et ses résultats :

- Des articles présentant les ambitions du modèle et de ses applications, et les règles du modèle dans le détail [SFM⁺05, SM08, PSB⁺09, BP08] ;
- Des articles exposant les résultats de campagnes d'expérimentation sur les applications Eurosim [SM08], Europe et Etats-Unis [PSB⁺09, BP10, BP08] ;
- Une analyse des propriétés du meta-modèle multi-agents, et une comparaison à neuf autres modèles dans un ouvrage de référence sur la simulation à base d'agents [TDZ08] ;
- Un rapport de stage de master centré sur une étude de sensibilité des mécanismes d'interaction [Sch08] ;
- Un site web dédié⁴, sur lequel nous revenons dans la section 7.

En nous inscrivant dans la distinction (clairement présentée dans [Meu04] et [DVM02], et reprise dans [TDZ08]), entre le *modèle de conception*, le *modèle opérationnel* et le *programme*, notre objectif dans cette section n'est pas de décrire les deux premiers des trois, et nous invitons le lecteur à se reporter aux sources mentionnées ci-dessus pour étudier comment ceux-ci traduisent la théorie évolutionnaire urbaine dont nous avons tracé les grandes lignes dans le chapitre précédent.

En revanche, bien que nous n'ayons pas participé à sa réalisation, il nous a semblé important de dédier quelques paragraphes à la présentation du *programme* **Simpop2**, et cela pour au moins deux raisons :

1. Le programme développé n'est que superficiellement présenté dans [Gli07], et n'a jamais fait l'objet d'une documentation écrite de plus haut niveau que les commentaires parcellaires intégrés au code⁵. L'implémentation d'un modèle est parfois considérée comme peu valorisante, notamment en comparaison de la conception, de l'expérimentation et des résultats. En 2002, forts de dix ans d'expérience en tant qu'informaticiens dans des projets de simulation orientée agents, [DVM02] notaient que « dans la plupart des projets existants, [un modèle opérationnel à base d'agents computationnels] est souvent négligé au profit d'une implémentation directe, ce qui est en partie dû au fait que l'informaticien, dans beaucoup d'institutions, est toujours considéré comme un simple « exécutant » (citant [Dav02]) ». Or le *programme* **Simpop2** se distingue en réifiant le modèle opérationnel dans un programme à base d'agents computationnels.
2. Une retombée attendue d'une collaboration avec des informaticiens est un logiciel fonctionnel pour étudier une question de recherche qui n'aurait pu l'être sans. Mais au vu des contraintes associées aux projets interdisciplinaires, parmi lesquelles leur durée, un petit nombre de développeurs, et de la volatilité de ces derniers, la maintenabilité du code est un critère tout aussi critique que ses fonctionnalités. Un code exprime des idées, c'est une pièce de savoir constructif. En faisant le point sur l'état actuel du code, nous discutons de l'incidence de certains choix techniques effectués sur sa maintenabilité et son devenir potentiel.

⁴<http://simpop.parisgeo.cnrs.fr>

⁵Ainsi qu'une documentation HTML basée sur ces commentaires, automatiquement générée par Doxygen

Nous commençons donc, dans la sous-section 2.1, par présenter ce programme à travers quatre aspects qui nous semblent significatifs : ses agents-villes à structure dynamique ; sa gestion du temps simulé ; sa représentation de l'espace et l'optimisation des calculs spatiaux ; et enfin sa maintenabilité. Dans la sous-section 2.2 nous regardons comment est implantée la notion géographique de fonction urbaine, et finalement dans la sous-section 2.3 nous listons les applications auxquelles le modèle générique *Simpop2* a donné naissance.

2.1 Le programme multi-agent

L'implémentation du modèle générique *Simpop2* et de ses applications s'appuie sur l'API *Swarm*, et donc sur Objective-C⁶. La présentation de morceaux choisis de ce programme nous permet d'en illustrer trois aspects intéressants. Avec le premier nous examinons la réponse apportée par les programmeurs de *Simpop2* à la question « Comment programmer des agents computationnels avec un langage à objets ? ». Nous essayons de démarquer l'agent de l'objet, nous déconstruisons l'ontologie urbaine réalisée, et nous regardons les constructions Objective-C mises à profit pour permettre de « dépasser » les limitations des objets du langage et constituer des *agents villes*. Le second point concerne la gestion du temps dans le modèle, sujet central en simulation. Le troisième concerne la représentation de l'espace et quelques optimisations pour accélérer les calculs spatiaux.

2.1.1 Comment programmer des agents-villes à partir d'un langage à objets ?

Agents et objets Nous l'avons dit dans le chapitre précédent, en simulation ces vingt dernières années, l'*agent* est un concept dont l'expressivité a prouvé son utilité à médier l'échange entre informaticiens et géographes en phases d'analyse et de conception, mais qui souvent s'évapore à la réalisation. Pour [DVM02], « les agents computationnels décrits en IAD ou en SMA (faisant référence à [Jen00]) ne sont tout simplement pas utilisés par la simulation orientée agents ». Pour le courant *geosimulation* par exemple, le terme « agent » est souvent assimilé à « un objet mobile qui représente un acteur humain » [BT04, BAN05]. L'implémentation est donc souvent une traduction objet « immédiate » et appauvrie, qui ne fait pas le lien avec les architectures d'agents computationnels. J. Ferber résumait cet antagonisme en disant que « les agents sont définis à un niveau conceptuel et les objets (...) aux niveaux d'implémentation et d'exécution » [Fer95], chap. 1).

Ce constat est frustrant, car il ne s'agit pas que d'une question esthétique, qu'on peut à bon droit considérer comme auxiliaire en simulation. Nous l'avons dit dans la section 4.5 du chapitre 2, celle-ci n'est pas un champ d'application privilégié de langages, et de plate-formes multi-agents de conception d'applications et de résolution de problèmes [EFSDB09, BDDEFS05], du fait que dans la plupart des cas, les objets et processus simulés imposent des contraintes dans leur traduction informatique qui font qu'ils ne se prêtent pas intuitivement à l'utilisation de ces techniques. Mais un des objectifs de la branche ingénierie logicielle des SMA est de proposer, en simulation également, des structures de données et de contrôle de plus haut niveau d'abstraction que celles fournies de base par les langages d'implantation « généralistes » utilisés. Pour ne pas réinventer la roue à chaque nouveau modèle d'un domaine applicatif, le but est de se rapprocher des objets et processus de ce domaine, soit en créant de nouveaux langages dédiés, soit avec des interfaces de programmation développées avec des langages existants. Cette deuxième option est

⁶Aujourd'hui la bibliothèque *Swarm* est disponible également en Java, mais ce n'était pas le cas au démarrage de l'implémentation de *Simpop2*. La première version de *Simpop2* en (Objective-C + *Swarm*) est une réécriture du code *Smalltalk* de *Simpop1*. Les « philosophies » très proches des deux langages [CL09] ont constitué un argument supplémentaire dans le choix de ces outils.

celle prise pour le développement de **Simpop2**, qui s'appuie sur *Swarm*, bibliothèque dédiée aux modèles à base d'agents. Mais avant de voir comment ces agents sont programmés, regardons les traits d'« agents » mis en avant dans le modèle conceptuel **Simpop2**.

Pourquoi des agents-villes ? Aux yeux des géographes le concept d'agent est pertinent pour décrire une ville en évolution au sein d'un système des villes. En effet, une expression computationnelle de la théorie évolutive urbaine requiert une représentation informatique des villes comme des entités qui soient :

1. *autonomes et décisionnelles...* , car le maintien des réseaux d'échanges au cours du temps tient compte de la dynamique passée, et une ville tendra à favoriser les villes avec lesquelles elle a entretenu des synergies profitables dans le passé. Sur l'échelle Réactif-Cognitif classique en SMA, cela fait d'elle un agent au comportement plus cognitif que réactif, dans la mesure où le comportement de l'agent dépend de la mémorisation de ses comportements passés ;
2. *mais tout de même gouvernées...* , car une ville est soumise à des réglementations et à des orientations stratégiques, prises par des gouvernances situées à plusieurs niveaux (local, régional, national, continental) de la hiérarchie politique administrant le système dont elle fait partie ;
3. *qui soient capable d'interagir...* avec d'autres villes (dans notre cas, d'échanger) au moyen d'une structure de communication, leur « place d'échanges », qui leur permet d'établir des réseaux d'échanges. Les modes de fonctionnement de ces réseaux, leur taille et leur amplitude spatiale dépendent de la fonction urbaine considérée ;
4. *et dont la structure est évolutive*, car une ville est capable d'acquérir de multiples fonctions urbaines au cours du temps, qui sont autant d'extensions à ses « capacités » initiales. Leur acquisition dépend de propriétés locales comme sa taille et sa situation, mais également de son niveau dans la hiérarchie (qui détermine ses chances de capter l'innovation). Sa position dans l'espace et sa structure spatiale sont fixes (à ce niveau d'analyse et d'organisation du territoire, une ville est considérée comme un point fixe dans un espace euclidien support, **Simpop2** n'ayant pas pour but de chercher à reproduire l'évolution au cours du temps de l'emprise spatiale des villes), en revanche *la structure de son état est dynamique* : le nombre de variables nécessaires à décrire l'état de la ville n'est pas le même d'une date à l'autre.

Dans **Simpop2**, *les agents représentent les villes*⁷ dans le modèle de conception. La volonté des programmeurs de **Simpop2** était de programmer en miroir des agents-villes computationnels. L'idée directrice de cette « programmation orientée agents » de l'ontologie urbaine, telle qu'elle a été pensée pour **Simpop2** et brièvement discutée dans [Gli07], est d'implanter un agent-ville non pas par une seule classe mais par un ensemble de classes. Tous les agents ont en commun de posséder un noyau (réalisé par la classe **Ville**), sur lequel peuvent dynamiquement venir se greffer des composants. Ce sont eux qui vont faire de l'objet un agent en lui fournissant de nouvelles capacités de perception, d'action, de communication, et de décision qui vont renforcer son autonomie. La structure dynamique de ces agents est réifiée : le nombre et le type des objets nécessaires à la représentation de l'état de l'agent évolue dynamiquement pendant la simulation.

Agents-villes et ontologie « Le travail ontologique autour de **Simpop2** a été important (c'est une des contributions du modèle). L'ontologie de **Simpop2** précise l'ontologie de *Simpop1* tout

⁷Ainsi dans la suite de ce chapitre, nous emploierons indifféremment les mots agent, agent-ville ou *ville* (en italique) pour désigner la représentation computationnelle d'une ville dans le modèle.

en l'englobant. L'essentiel de l'ontologie est rassemblé autour de l'agent ville. Cet agent est décomposé en plusieurs composantes qui remplissent chacune un rôle spécifique.» ([Gli07], p.131)

Cette ontologie est représentée sur la figure 4.2. La classe **Ville** (City⁸) constitue le noyau de l'agent, c'est le conteneur des variables d'état communes à toutes les villes du modèle, dont la population, la richesse, et les coordonnées spatiales. C'est elle qui va articuler les composants qui peuvent dynamiquement venir s'y greffer. Ces composants sont représentés par les classes incluses dans le rectangle à bords arrondis.

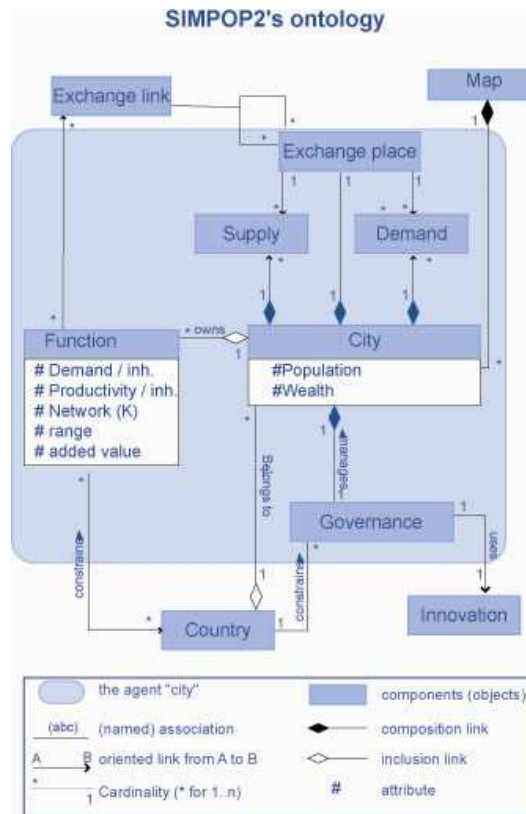


FIG. 4.2 – Diagramme de classes représentant l'ontologie urbaine exprimée par Simpop2 (réalisation collective de l'équipe Simpop2, tiré du site www.simpop.parisgeo.cnrs.fr)

La classe **Fonction** (Function) encapsule tout ce qu'il y a de générique dans la notion de fonction urbaine. Nous en détaillons l'implantation dans la section ???. Le portefeuille des fonctions d'une ville est évolutif : une ville peut acquérir de nouvelles fonctions mais elle peut aussi en perdre, si la fonction n'est pas rentable ou lorsqu'elle tombe en obsolescence. Chaque agent ville peut en posséder de zéro à N. La possession d'une fonction urbaine entraîne la création d'une **Offre** (Supply) de services ou de biens correspondant à la production de la ville. Ces offres sont destinées en priorité à satisfaire la **Demande** (Demand) locale puis les **Demandes** exprimées par les autres villes.

La **Place d'échanges** correspond à l'interface entre la ville et le système, elle est notamment composée de **Liens d'échanges**. Un lien d'échange représente une accointance entre deux villes et garde la mémoire de leurs échanges passés. **Innovation** est l'entité qui contient les mécanismes de ventilation des fonctions urbaines parmi les villes, et les paramètres de ces mécanismes : nombre de villes « recevant » chaque fonction, dates de diffusion, et éventuellement contraintes

⁸Les noms de classes sont suivis, entre parenthèses, du nom traduit tel qu'il figure sur le diagramme en anglais.

géographiques associées à cette diffusion. La **Carte** (Map) représente l'espace géographique du système des villes simulé, dans lequel sont plongés les agents. C'est cette entité qui est responsable des calculs spatiaux préalables à la détermination des réseaux d'interaction associés à chaque fonction urbaine. Une ville est également partie intégrante d'un **Pays** (Country), qui impose notamment des frontières qui déterminent les réseaux d'interaction des **Fonctions** de type administratif.

Une ville possède une **Gouvernance** (Governance), qui peut être individuelle à la ville ou commune à plusieurs villes, dans des limites régionales, nationales, de « bloc », de continent. La gouvernance représente des réglementations politiques qui peuvent venir amender le fonctionnement générique de la dynamique d'échanges de fonctions de la ville. Ce composant est un cadre dans lequel on peut inscrire des mécanismes traduisant des choix politiques et culturels spécifiques à chaque application (à chaque système de villes simulé).

Structures de langage à objets pour programmer des agents villes L'expressivité naturelle des langages à objets pour implanter des modèles de conception à base d'agents a été maintes fois soulignée [Fer95, DVM02, BT04]. En revanche il nous semble intéressant d'illustrer comment les constructions d'un langage objet cible ont été utilisées pour refléter à la fois une structure d'agent computationnel et la méthodologie comparative choisie. Nous rappelons que celle-ci suit un principe de parcimonie et s'appuie pour cela sur un modèle générique paramétrable spatialement, et instancié en des applications distinctes embarquant les mécanismes traduisant les processus historiques spécifiques à chaque système de villes (*cf.* chapitre 3 section 5).

Les *protocoles* et les *catégories* sont deux constructions Objective-C qui, comme l'héritage, permettent d'organiser la déclaration et la définition des classes d'une application.

Protocoles et polymorphisme. Un protocole Objective-C est un regroupement de déclarations de méthodes. N'importe quelle classe peut adopter un protocole, et une même classe peut adopter plusieurs protocoles. Une classe qui adopte un protocole doit proposer une définition de chacune de ses méthodes. Cette structure est l'une des influences des interfaces JAVA [Dun03].

Les protocoles permettent à la fois un contrôle des types à la compilation, tout en permettant le *polymorphisme*, c'est-à-dire l'indépendance entre le code envoyant le message, et l'implémentation effectivement exécutée du message, qui dépend du type du receveur du message. Ce type est déterminé à l'exécution et peut changer pendant la simulation.

Simpop2, sur le modèle de gros *frameworks* Objective-C comme *Cocoa*, utilise massivement les protocoles. Ils sont tous déclarés dans un fichier qui constitue la déclaration de l'ontologie informatique et la définition des interfaces des composants du modèle opérationnel. Les classes de **Simpop2** adoptent toutes un sous-ensemble de ces protocoles (pour la plupart il y a une correspondance 1 : 1 entre protocole et classe).

L'utilisation de protocoles traduit cette idée de *composants interchangeables*, tressée par les programmeurs de **Simpop2**. La classe **Ville** définit, par son interface, le protocole de communication entre le noyau de l'agent et ses composants dynamiques. Toute classe, dans la mesure où elle adopte ce protocole de communication avec le noyau, peut instancier des objets qui jouent le rôle de composant constituant une « partie » dynamiquement ajoutée à l'agent-ville. De plus les protocoles facilitent le développement incrémental et la répartition des tâches entre les développeurs.

Catégories. Une catégorie à plusieurs intérêts : elle permet d'adapter le comportement d'une même classe de façon différente pour des applications distinctes, sans avoir à définir de

nouvelle classe. Elle sert à modifier une classe incluse dans une bibliothèque, sans avoir accès aux sources. Les catégories permettent également de découper et répartir l'implémentation d'une classe entre plusieurs développeurs, de modulariser la compilation de classes volumineuses et, en répartissant la définition des classes entre plusieurs fichiers, de répartir logiquement du code en groupant des méthodes, sémantiquement proches mais appartenant à des classes différentes, dans un seul et même fichier [Doc06]. Elles peuvent être un substitut à l'héritage en y ajoutant, sans approfondir l'arbre des classes, de nouvelles classes contenant peu de « valeur ajoutée ».

Dans Simpop2 des catégories sont utilisées :

- pour redéfinir les méthodes des classes du paquetage *base.espace*, le composant *Carte* par exemple, pour les adapter à la géographie du système de villes simulé. Par exemple la méthode :

```
getImageVille : _ville X : (int*) _x Y : (int*) _y
```

 qui retourne, pour la ville passée en paramètre, ses coordonnées sur le fond de carte, est redéfinie dans une catégorie spécifique pour chaque application.
- pour redéfinir des méthodes des classes du paquetage *collections* de *Swarm*, pour en améliorer la performance.

Typage dynamique. Objective-C fait partie des langages autorisant le typage dynamique, la distribution dynamique des messages et le chargement dynamique. Le développeur est par exemple libre de déclarer toutes ses variables du type générique *id*⁹, à charge pour lui de gérer les erreurs de distribution de messages pouvant intervenir à l'exécution.

Outre la simplicité d'utilisation (pas de *cast*, délégation des messages aisée), différer à l'exécution l'assignation des types et la construction de la table d'appels est une fonctionnalité intéressante pour concevoir des applications interactives, par exemple des interfaces graphiques où le programme doit adapter sa réponse en fonction des choix effectués par l'utilisateur à l'exécution. En simulation de systèmes dynamiques, si l'exécution du modèle est interactive, et si l'on souhaite que l'expérimentateur puisse prendre des décisions à l'exécution (par exemple forcer le changement de type d'un agent), le typage dynamique autorise une plus grande concision dans l'écriture du code, car il n'y a pas alors à traiter plusieurs cas de figure correspondant aux types potentiels du receveur du message.

2.1.2 La gestion du temps

La plupart des modèles opérationnels se divisent entre ceux basés sur une horloge et ceux guidés par les événements. Simpop2 articule ces deux modes :

1. les étapes suivent un ordre séquentiel strict, identique dans le code et dans le modèle opérationnel arrêté par les géographes¹⁰. Chaque itération, dans les applications Etats-Unis et Europe, représente dix années simulées.
2. certaines règles du modèle déclenchent l'ajout dynamique d'événements au déroulement normal d'une itération.

Donnons un exemple : la classe *Innovation*, responsable de la ventilation spatiale des fonctions parmi les agents, est également responsable de l'activation de nouveaux agents à chaque pas de temps. Pour les applications « pays neufs », où cette activation de nouveaux agents se fait suivant une logique géographique et temporelle (l'avancée d'un front pionnier, cf. section 4.1.4), la règle d'activation est complétée d'une règle de « bonus de croissance ». Lorsqu'un agent

⁹Un *id* est un pointeur sur un objet

¹⁰voir <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/iteration.php>.

est activé, si il se situe dans la zone à l'avant du front pionnier, il bénéficie d'une croissance supplémentaire durant les trente ans (trois itérations) qui suivent son apparition¹¹.

Pour les agents qui bénéficient de ce mécanisme, la date de son arrêt dépend de la date de son démarrage, laquelle est le résultat d'un processus pseudo-aléatoire décidé à l'exécution. Elle ne peut être déterminée dans le code. L'implantation de ce type de mécanismes est grandement accélérée par les classes du paquetage *activity* de Swarm, qui simplifient la gestion de l'ordonancement d'une simulation. Le meta-modèle organisationnel de Swarm est celui de collection d'agents (un swarm) imbriquées selon une hiérarchie (stricte), chaque swarm possédant un emploi du temps auprès duquel les agents qu'il contient enregistrent leurs actions à la date à laquelle ils doivent l'effectuer. Cette date peut-être donnée de façon absolue ou relative. Cette gestion expressive du temps simulé a toujours été considérée comme l'un des points forts de *Swarm* (cf. [TDZ08], chap.6; [RLJ06]).

2.1.3 Représentation spatiale et optimisation de calculs spatiaux

Dans les modèles vus au chapitre 2, le recours au agents se faisait principalement pour décrire des entités mobiles dans un environnement, lui-même souvent représenté comme un automate cellulaire. Quand ils n'intègrent pas d'entités mobiles, les modèles distribués de territoires en évolution sont souvent exprimés par des automates cellulaires. La prise en compte de réseaux d'interaction dont le fonctionnement dépend des interactions passées nécessiterait de représenter des automates à « cellules mémorisantes ». La prise en compte de l'action à distance et de contraintes globales de volume finit de justifier le recours à un paradigme multi-agents plutôt qu'AC. Mais en décrivant l'évolution d'*agents fixes* dans l'espace, le modèle est à la fois *entité-centré et espace-centré*, ce qui brouille les frontières tracées dans le chapitre 2.

Dans *Simpop2* les agents sont localisés et fixes dans un espace euclidien 2D. Un choix contre-intuitif du modèle opérationnel est que l'évolution des distances-temps¹² entre les villes au cours du temps (<Obs, SVilles, Transports>) n'est pas rendue par un graphe dynamique, mais par l'augmentation de la valeur du paramètre *portée* des *Fonctions* au cours du temps simulé. Les seules distances entre villes considérées sont donc les distances dans l'espace euclidien, elles restent fixes tout au long de la simulation. La matrice des distances n'a pas à être recalculée à chaque pas de temps.

Optimisation de calculs de distances. La classe *Grille* du paquetage *base.espace* contient des méthodes qui permettent d'optimiser les temps de calcul associés. En effet, le nombre d'agents dans certains modèles (5000 dans *Eurosim*) et le mécanisme itératif des marchés d'échanges de fonctions, qui se poursuit jusqu'à ce que plus aucun échange ne puisse être effectué sur tous les liens d'échanges¹³, impliquent de très nombreux calculs pendant la simulation pour déterminer si les agents sont ou non en situation d'interaction spatiale.

Donnons un exemple : à chaque itération, chaque ville interagit avec les autres villes à travers sa place d'échanges et ses fonctions urbaines. Pour déterminer son réseau d'acointances pour chacune des fonctions pour lesquelles elle émet une offre ou une demande, elle doit déterminer la distance qui la sépare des autres villes, et déterminer si cette distance, à la date considérée, permet l'interaction pour cette fonction (les distances d'interaction évoluent au cours du temps). Dans une application à 5000 villes, nous aurions potentiellement besoin de comparer toutes les

¹¹Cette règle traduit la croissance supplémentaire induite par la migration massive des pionniers dans ces villes en avant du front.

¹²i.e des temps de parcours. Les distances-temps entre les villes évoluent au cours du temps avec l'évolution des transports, au contraire des distances physiques.

¹³<http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/rules.php>

distances séparant chaque couple de villes, soit plus de 2.10^6 distances, à la distance d'interaction de référence (la valeur courante du paramètre *portée* de la fonction considérée).

Un cache est associé à chaque place d'échange, donc à chaque ville. On ne cherche donc jamais à connaître la distance entre une ville X et toutes les autres villes et à déterminer celles qui sont à bonne distance, mais à connaître toutes les villes qui sont à une distance inférieure ou égale à *portée*. Plutôt que de calculer les distances à toutes les autres villes et sélectionner celles qui sont situées dans un périmètre *portée*, l'espace est découpé en une grille, et à chaque cellule de la grille est associée la liste des villes situées dans cette cellule. On trace un cercle de rayon *portée* autour du carré qui contient X. En fait on trace un quart de cercle et on obtient le reste du cercle par symétrie d'axe des coordonnées des carrés. Toutes les villes qui sont stockées dans les caches des carrés complètement inclus dans le cercle peuvent être restituées sans avoir besoin de comparer la distance qui les sépare de X à la valeur *portée*. Il n'y a que pour les villes qui sont dans des carrés en bordure de cercle de rayon *portée* qu'il faut calculer ces distances.

2.1.4 Maintenabilité et évolution du programme Simpop2

Etat des lieux Dans sa version actuelle, le programme de l'application Etats-Unis est composé d'environ 23.500 lignes de code en Objective-C et C, réparti en 42 classes. Le code de chaque application est séparé en deux parties. L'une est commune à toutes les applications, elle correspond au modèle générique, et elle est contenue dans un paquetage *simpop.base* de 13.500 lignes environ. L'autre est spécifique à chaque application, elle contient environ 10.000 lignes pour l'application Etats-Unis. En fait les poids des deux parties rendent mal compte du ratio entre mécanismes génériques et mécanismes spécifiques, car des développements sur les applications ont été faits dans l'urgence et le travail de factorisation et de hiérarchisation du code n'a pas été mené jusqu'au bout. Certaines parties du code, dupliquées pour chaque application, correspondent en fait à des mécanismes communs. Cela entraîne des limites de maintenabilité et des risques d'incohérence dont nous rediscutons dans la section 6.3.

Évolution future : vers un redéveloppement et la constitution d'une API à partir du code existant. Un manque de documentation, des constructions abandonnées par les versions ultérieures de *Swarm* et du compilateur GCC, ainsi que certains choix d'implémentation effectués rendent des parties du code très coûteuses à reprendre et étendre. Par exemple, en dépit du travail de définition d'interfaces fait avec les protocoles, d'importantes parties du code des classes est typé sans utiliser ces protocoles (variables déclarées du type générique *id*). Cela n'apporte pas d'avantage autre que la rapidité de première écriture, et cela rend les parties concernées plus difficiles à reprendre qu'un code typé statiquement ou par un protocole, plus auto-descriptif. Un travail de refactorisation est nécessaire pour valoriser l'ontologie urbaine programmée (paquetages *base.espace*, *base.politique*, *base.economie*) et en faire une API utilisable par d'autres modèles. La réécriture devrait aboutir à un code moins volumineux, car des classes entières ne sont plus utiles, leurs fonctionnalités étant assurées par les versions ultérieures de *Swarm*, ou bien par d'autres bibliothèques.

Le besoin de réécriture pose la question des outils actuellement les mieux intéressants pour développer un modèle spatial, multi-agents et à structure dynamique comme *Simpop2*. Parmi ceux étiquetés « simulation à base d'agents », *Repast* semble être la solution actuellement la plus plébiscitée [TDZ08, RLJ06, CC06], du fait des langages dans lesquels elle est disponible, et des fonctionnalités qu'elle offre pour l'exploitation des modèles développés. Mais au vu du travail en cours sur notre « système d'exploitation » de modèles, présenté dans la section 7, après avoir proprement découplé le modèle de ses outils d'exploitation et assuré leur interfaçage, nous

trouvons moins d'arguments en faveur de ces outils étiquetés « simulation à base d'agents », dans leurs versions actuelles. Il nous semble que pour la réalisation du seul modèle, le choix du langage doit être prioritaire :

- soit opter pour des langages généralistes comme Java, Python, C++, plus classiques mais qui disposent d'environnements de développement plus complets et de très nombreuses bibliothèques ;
- soit tester des langages dédiés à la simulation de systèmes dynamiques (par exemple MGS [GM01, GS08a, GS08b]), qui offrent des structures de données et de contrôle spatiales, plus proches des objets et des processus du domaine simulé, et qui permettent de programmer les modèles en se focalisant uniquement sur leurs aspects « sémantiques ».

Ces aspects du programme **Simpop2** nous ont permis d'illustrer une programmation qui essaye d'être un prolongement du modèle de conception et du modèle opérationnel, en tentant de donner corps à l'idée d'agents computationnels qui seraient le miroir des agents du modèle élaboré avec les experts. Le code résultant d'une telle démarche doit être plus expressif et plus maintenable. L'architecture logicielle réalisée reflète également la méthodologie de recherche choisie, en séparant logiquement le modèle générique des applications et leurs mécanismes spécifiques, via des paquetages différents. Cette architecture prend tout son sens lors de la réalisation d'une nouvelle application à un autre système de villes. Le coût de développement pour implémenter un premier prototype est alors faible, car grâce à l'héritage tout ce matériel commun peut être étendu par les classes spécifiques à chaque nouvelle application.

2.2 Fonctions urbaines et modélisation de l'innovation

Les fonctions urbaines et **Simpop2** La fonction urbaine est un concept défini par les géographes à l'échelle interurbaine et porté par la théorie de la diffusion spatiale des innovations et la théorie évolutionnaire urbaine [Pum97, BPVM07]. Elle caractérise un rôle joué par la ville qui la possède au sein du système des villes dont elle fait partie. A la différence d'une catégorie dans une nomenclature d'activités socio-économiques, une fonction urbaine regroupe un ensemble d'activités de même génération, corrélées entre elles et qui passent par un même cycle d'apparition, de développement et d'obsolescence, qui affecte les dynamiques urbaines ([PPK06], entrée *Fonction Urbaine*). La table 1 regroupe les fonctions urbaines utilisées dans les applications Europe et Etats-Unis. Il y est indiqué pour chacune le type des interactions spatiales associées à la fonction, une description des biens et services représentatifs, ainsi que les dates d'activation de ces fonctions pour chacune des applications de **Simpop2**.

Le comportement de ces dix fonctions urbaines dans le modèle est générique : l'algorithme spécifiant la dynamique des échanges entre villes lors d'une itération est le même pour toutes les fonctions¹⁴. Chaque fonction urbaine est individualisée par :

- le paramétrage : les attributs *productivité*, *demande*, *portée*, *valeur ajoutée* et *taille des réseaux préférentiels* ;
- les contraintes spatiales associées à la phase de constitution du réseau d'échanges.

Le paramétrage de chaque application inclut, pour chaque fonction, la définition du profil temporel de chacun de ses paramètres. La figure 4.3 montre l'interface de l'éditeur d'équations du *Navigateur Simpop* qui permet ce profilage. Ces valeurs ne peuvent être calées sur les données économiques historiques que jusqu'à un certain point, dans la mesure où la fonction urbaine reste une notion conceptuelle pour laquelle il n'existe pas de données immédiatement disponibles.

¹⁴voir <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/rules.php> et <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/iteration.php>

Type de fonction	Interactions spatiales	Nom	Description	App. Europe	App. E.-U.
Administrative	Basées sur l'appartenance à un même territoire politique	CHEF-LIEU	Fonction administrative de type capitale régionale	1300	1800
		CAPITALE	Fonction administrative de type capitale nationale	1500	1800
Biens et services « communs »	Basées sur la proximité spatiale	CENTRALE1	Service de base (ex. boulangerie, école, médecin généraliste)	1300	1650
		CENTRALE2	Service de niveau moyen (ex. poissonnerie, collège, dentiste, cinéma)	1300	1780
		CENTRALE3	Service de niveau élevé (ex. hypermarché, lycée, ophtalmologiste)	1800	1830
		CENTRALE4	Service de niveau supérieur (ex. centre commercial, université, CHU, opéra)	1900	1900
Innovante	Basées sur l'appartenance à un réseau	CYCLE1	Grand commerce maritime	1300	1650(E) 1850(W)
		CYCLE2	1ère révolution industrielle (machine à vapeur, sidérurgie, textile)	1800	1830
		CYCLE3	2ème révolution industrielle (pétrole, électricité, automobile)	1900	1880
		CYCLE4	Technologies de l'information et de la communication (informatique, high-tech)	1950	1940

TAB. 1 – Les fonctions urbaines modélisées dans **Simpop2**, et leurs dates d'activation pour chacune des applications.

Modéliser l'innovation ? Proposer des modèles génératifs de l'innovation est un exercice très difficile. Plusieurs grandes questions distinctes peuvent être distinguées :

1. **Quand** apparaît l'innovation ?
2. **Où** apparaît-elle ?
3. **Pourquoi** apparaît-elle ?
4. **Comment**, sous quelles formes apparaît-elle ?

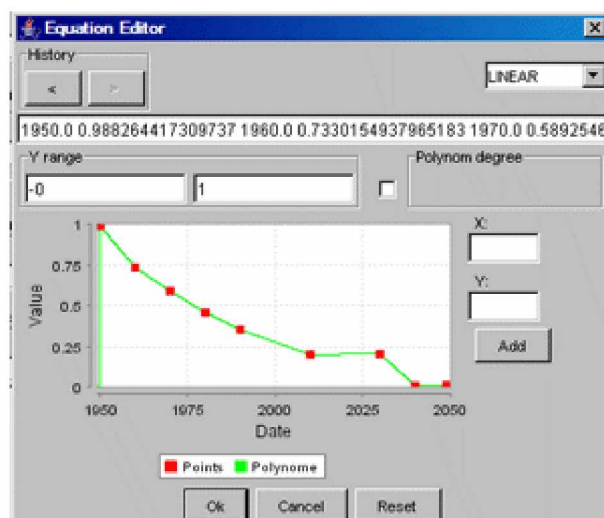


FIG. 4.3 – Interface de l'éditeur d'équations du *Navigateur Simpop*. Il permet de définir graphiquement (par positionnements de points et extrapolation de la fonction voulue, qui peut être affine par morceaux, par paliers, ou un polynôme de degré arbitraire) la trajectoire temporelle des paramètres associées à chaque fonction urbaine : *portée*, *productivité*, *demande*.

Le **Quand** et le **Comment** ne sont pas au cœur de Simpop2, qui cherche uniquement à proposer un schéma explicatif aux questions **Où** et **Pourquoi**. Simpop2 puise ses réponses dans la théorie de la diffusion spatiale des innovations. Il simule la façon dont le système réagit sous l'impact de l'innovation, comment il l'absorbe et évolue sous son effet. Pour cela il ventile des fonctions urbaines toutes préparées, selon un échéancier et des contraintes de volume paramétrés.

Le code inclut donc une classe pour chaque fonction urbaine présentée dans le tableau précédent. Les trajectoires de leurs attributs sont paramétrées pour chaque application, de même que les dates d'activation et le nombre de villes qui les acquièrent à chaque date.

2.3 Les applications

Outre les applications Europe et Etats-Unis, d'autres instantiations de ce modèle générique ont été faites. La plus importante est le modèle Eurosim [SFG⁺06, San06, San07, SM08, PSB⁺09]. Eurosim s'est développé en parallèle des applications long-terme, et poursuit des objectifs sensiblement différents. Il aborde le développement urbain en Europe sur la période 1950-2050 avec comme objectifs de tenter une validation à la fois fine et multi-échelles sur la période 1950-2000, pour ensuite proposer des prévisions de grandes tendances sur la période 2000-2050. Nécessairement cette application injecte plus de données et de connaissances dans les situations initiales et dans les règles (des fonctions urbaines supplémentaires sont par exemple introduites), et la résolution temporelle des mécanismes (le pas de temps) est affinée à un an. La variété des analyses statistiques effectuées nous permettent de dire que l'expérimentation avec Eurosim a été poussée plus loin que ce qui est fait dans la littérature sur la simulation en géographie. L'effort porté sur l'analyse des sorties à plusieurs niveaux d'échelle géographique a été formalisé par les auteurs dans un protocole, qualifié de « validation multi-niveaux », dans la mesure où sont analysées les trajectoires de villes isolées (*micro*), de groupes de villes (d'un même état ou bien partageant les mêmes spécialisations) (*méso*), et du système dans son ensemble (*macro*) [SFG⁺06, SM08].

Il existe également une application Afrique du Sud long-terme. Nous l'évoquerons dans la

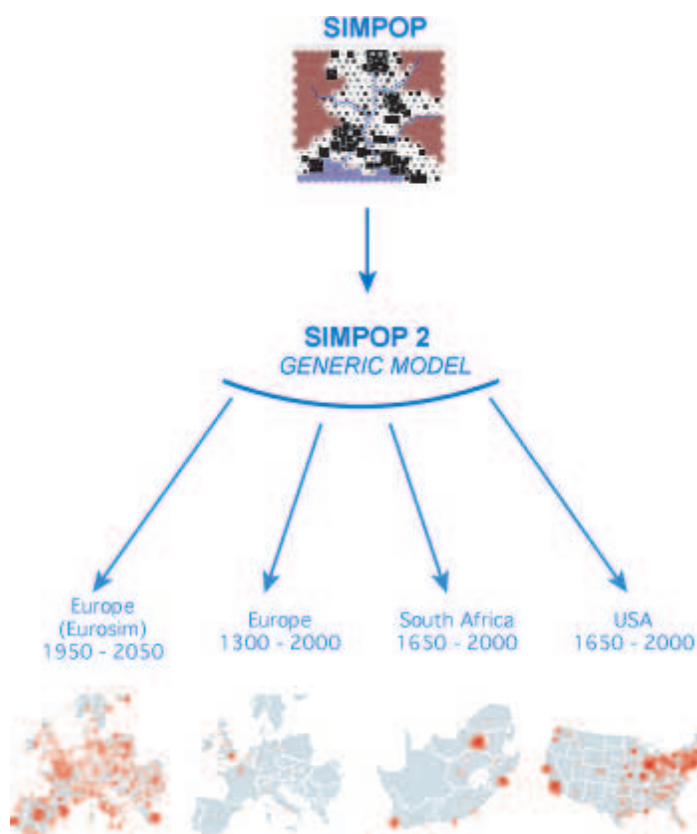


FIG. 4.4 – Les applications de Simpop2.

section 5 pour illustrer les possibilités de généralisation des mécanismes implantés pour l'application Etats-Unis. Par ailleurs, il est prévu deux applications supplémentaires dans les années à venir, sur l'Inde et la Chine.

3 Expérimentations avec l'application Europe

Les expérimentations et les résultats présentés dans cette section ont été décrits dans le détail dans [PSB⁺09, BP10, BP08]. Nous n'en présenterons ici que les points les plus saillants.

3.1 Situation initiale de référence

Les premières simulations ont été effectuées sur un semis de points théorique et régulier. Les meilleurs paramétrages arrêtés, trouvés « à la main » par essais successifs, sont alors appliqués en passant sur un espace géoréférencé, où les agents-villes sont disposés aux localisations réelles des agglomérations urbaines de plus de 10.000 habitants. Le rythme de leur activation suit l'évolution historique, dont les dernières phases sont données par le tableau 2.

3.2 Résultats

A l'issue d'une première campagne d'expérimentation, les constats principaux des géographes sont les suivants [BP10] :

1. La population totale est sous-estimée : 280 millions au lieu de 335.

	1900	1950	2000	Surface (million km ²)
Europe	2532	3702	5123	4.8
États-Unis	382	717	934	7.8

TAB. 2 – Evolution du nombre de villes en Europe et aux Etats-Unis

2. La distribution du nombre de villes suit bien une progression géométrique décroissante en fonction de la taille, et elle est plus hiérarchisée sur le semis des points réel que sur le semis théorique.
3. Le rôle de la structure spatiale (distances et frontières) est mis en évidence dans cette comparaison espace réel / espace théorique. Par exemple, sur le semis théorique où les villes sont régulièrement espacées, treize des agents qui possèdent la fonction urbaine **CAPITALE** (« agents-capitales ») figurent parmi les vingt plus grands à la fin de la simulation. Ce nombre passe à deux (Paris et Rome) lorsqu'on passe sur le semis réel et que l'on attribue la fonction aux agents localisés en lieu et place des villes ayant effectivement tenu ce rôle au cours du temps. L'explication est double : pour les agents-capitales situés dans les régions périphériques moins denses, ils sont trop loin d'autres agents pour bénéficier des marchés d'échanges et de la croissance associée, tandis qu'au contraire les agents-capitales situés au milieu de zones contenant de nombreux agents plus grands sont victimes de leur concurrence. Cette comparaison met en évidence le rôle des distances (cf. modèle gravitaire présenté dans la section 1.3 du chapitre 2) et des effets de concurrence locale dans les mécanismes d'interaction modélisés.
4. L'évolution dans le temps de la trame des villes est mal rendue : à l'exception des zones industrielles, le basculement du « centre de gravité de l'Europe » du sud au nord n'est pas reproduit par la simulation. Les règles génèrent trop de dépendance aux premières phases du développement. Ce constat est un résultat, il amène à réfléchir à une formalisation des forces antagonistes ayant entraîné ce déclin hiérarchique des villes du sud de l'Europe au profit de celles du nord.
5. Enfin à un niveau *meso*, celui des pays, la structuration hiérarchique interne est mal restituée pour des pays comme la France et l'Espagne, à forte tradition centralisatrice. Individualiser une entité **Gouvernance** au niveau des entités **Pays**, et modifier les mécanismes de marché pour les rendre sensibles au statut administratif des villes, sont deux possibilités à tester pour tenter de générer des hiérarchies plus marquées dans ces deux pays. Cela fait partie des points à tester lors d'une future campagne de simulations.

3.3 Vers une expérimentation comparative Europe *vs.* Etats-Unis

L'application du modèle en l'état sur l'espace états-unien, avec les paramétrages arrêtés pour l'application Europe, et en changeant le rythme d'activation des agents pour le faire correspondre aux données historiques, produit des résultats « extrêmement médiocres » mais informatifs sur les manques à combler [BP10]. A ce moment du projet, deux orientations sont possibles :

1. tenter un nouveau calibrage sur l'espace états-unien, en conservant le modèle dans son état actuel, et en testant de nouveaux paramétrages ;

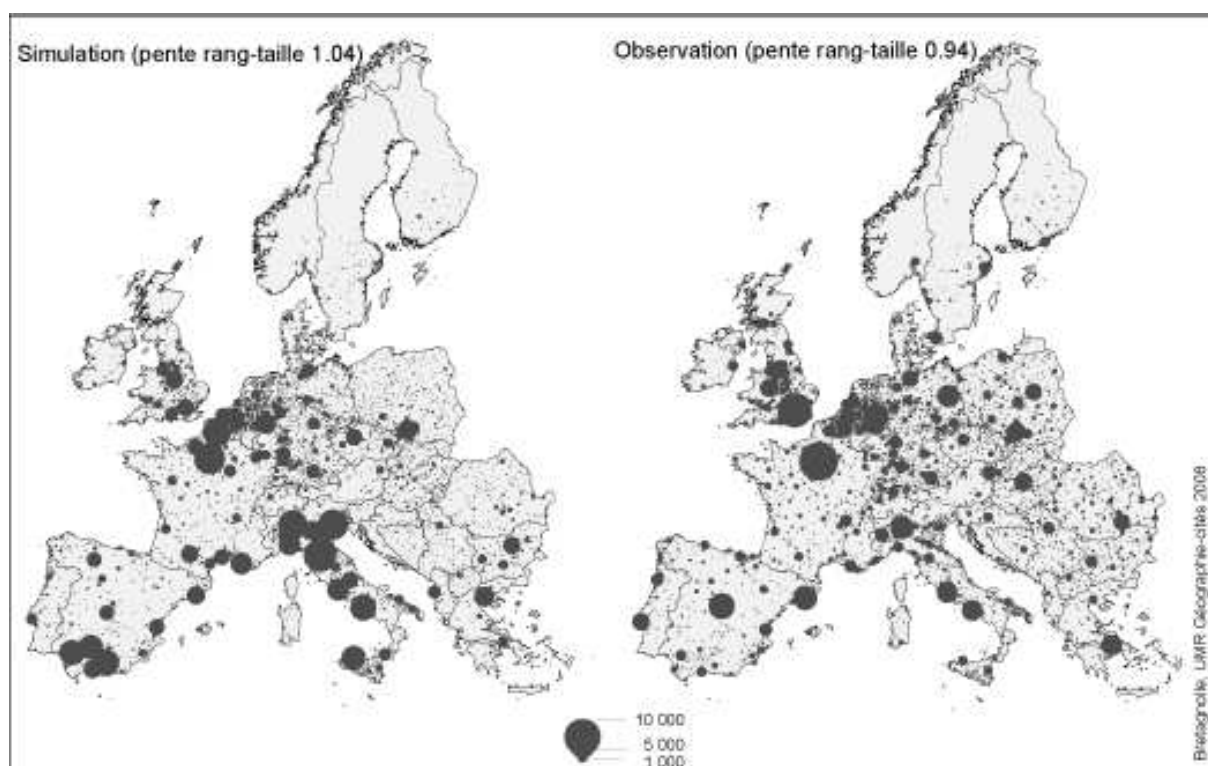


FIG. 4.5 – Trames spatiales simulée (à gauche, obtenue avec l'un des meilleurs paramétrages trouvés), et observée (à droite) de l'Europe en 2000. La distribution de peuplement simulée est plus hiérarchisée que dans la réalité, et la trame des villes à l'état final illustre la difficulté à simuler le basculement Sud-Nord qui s'est opéré avec la première révolution industrielle.

2. concevoir et développer des mécanismes traduisant les observations spécifiques **<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>**, **<Obs, SVilles, Gisements>**, **<Obs, SVilles, Ports>** et **<Obs, SVilles, Transports>**.

Le coût d'une campagne de calibrage, en l'absence d'outils automatisant l'enchaînement et la comparaison de simulations sur la base d'indicateurs synthétiques (cf. section ??), voire même automatisant ce calibrage, additionné aux contraintes temporelles associées au projet, plaident en la faveur de la seconde orientation.

La section suivante est donc consacrée aux mécanismes que nous avons développés. Dans la section 4.1 nous montrons que la modélisation de **<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>** et **<Obs, SVilles, Gisements>** peut être faite à l'aide de *dictionnaires imbriqués*, une structure de données qui permet d'exprimer efficacement des connaissances dans l'espace et dans le temps injectées comme des contraintes qui permettent d'encadrer la simulation du développement de systèmes historiques. La section 4.2 présente le mécanisme économique ¹⁵ permettant de tenir compte du rôle plus important de certaines villes passerelles aux Etats-Unis, lors des cycles d'innovation successifs (**<Obs,SVilles,Ports>**).

Ces développements se sont faits en parallèle de l'avancée de l'expérimentation, qui a été pilotée par les géographes. Ils ont été ajoutés au fur et à mesure de l'obtention des résultats, pour tenter d'affiner le calibrage.

¹⁵réalisé avec B. GLISSE et A. BRETAGNOLLE

4 Mécanismes spécifiques pour l'application Etats-Unis

4.1 Une structure de données pour la simulation historique : les *dictionnaires imbriqués*

4.1.1 Problème 1 : reproduire la colonisation du territoire par un front pionnier (<Obs, SVilles, Colo.Spatiale>)

Nous avons vu avec l'observation <Obs, SVilles, Colo.Spatiale> que la colonisation du territoire américain par les villes s'est effectué de façon séquentielle selon une progression d'est en ouest pendant tout le 19^{ème} siècle (cf. figure 4.6). Avec *Simpop2*, les géographes ne cherchent pas à formaliser dans les règles les causes locales de l'apparition des villes à un endroit de l'espace plutôt qu'à un autre. Il faudrait pour cela intégrer des éléments de géographie physique pour différencier l'espace en termes de ressources, et rendre compte de l'apparition de sites favorables. Cela ne fait pas partie des hypothèses à tester, et pour l'application **États-Unis** comme pour l'application Europe, les localisations spatiales potentielles des agents sont donc connues avant le déroulement de la simulation, et sont toujours les mêmes d'une simulation à l'autre. Ces localisations spatiales sont celles des agglomérations urbaines qui ont aujourd'hui plus de dix mille habitants. Pour accentuer la correspondance modèle-réalité, chaque agent porte également le nom de la ville localisée au même endroit dans la réalité.

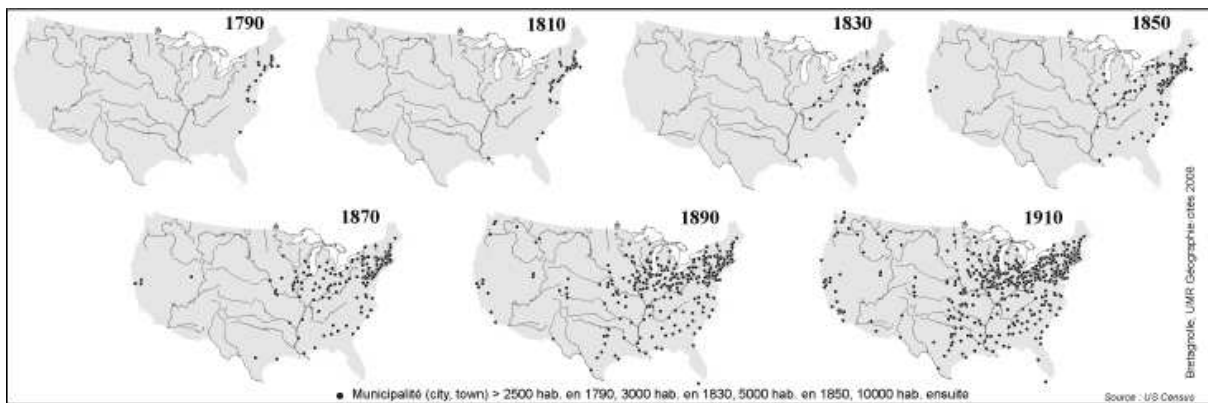


FIG. 4.6 – Progression historique est-ouest du front pionnier états-unien. Chaque carte représente le semis des villes de plus de 10.000 habitants à la date correspondante

Les agents doivent être activés dynamiquement tout au long de la simulation selon un ordonnancement qui respecte la connaissance historique. Pour les villes importantes, la date d'apparition peut être définie avec précision par les sources bibliographiques, mais pour d'autres cette information est plus difficile à déterminer. Les règles doivent traduire cette connaissance imparfaite. De plus, chaque agent activé à l'avant du front pionnier doit recevoir un bonus de croissance pendant un nombre paramétré d'itérations.

4.1.2 Problème 2 : intégrer des contraintes spatiales dans le mécanisme émulant la compétition pour l'innovation (<Obs, SVilles, Gisements>)

L'observation <Obs, SVilles, Gisements> indique que les cycles d'innovations ont été aux Etats-Unis plus corrélés à des zones particulières de l'espace qu'en Europe. Dans *Simpop2* chaque cycle d'innovation est représenté par une fonction urbaine. Dans les processus de la théorie évolutionnaire urbaine mis en œuvre dans *Simpop2*, il n'y a pas l'ambition d'expliquer

l'apparition de l'innovation. Celle-ci est donnée de façon exogène par un mécanisme qui fait « rentrer » les fonctions urbaines à des dates paramétrées pour chaque application, et dans des proportions (le nombre de villes réceptrices) également paramétrées. En revanche le mécanisme de ventilation parmi les agents de ces fonctions urbaines innovantes est simulé. Les règles de ventilation de l'application Europe ne tiennent pas compte des localisations des agents candidats à la captation des fonctions innovantes. Nous devons les modifier pour en tenir compte dans les règles de l'application Etats-Unis.

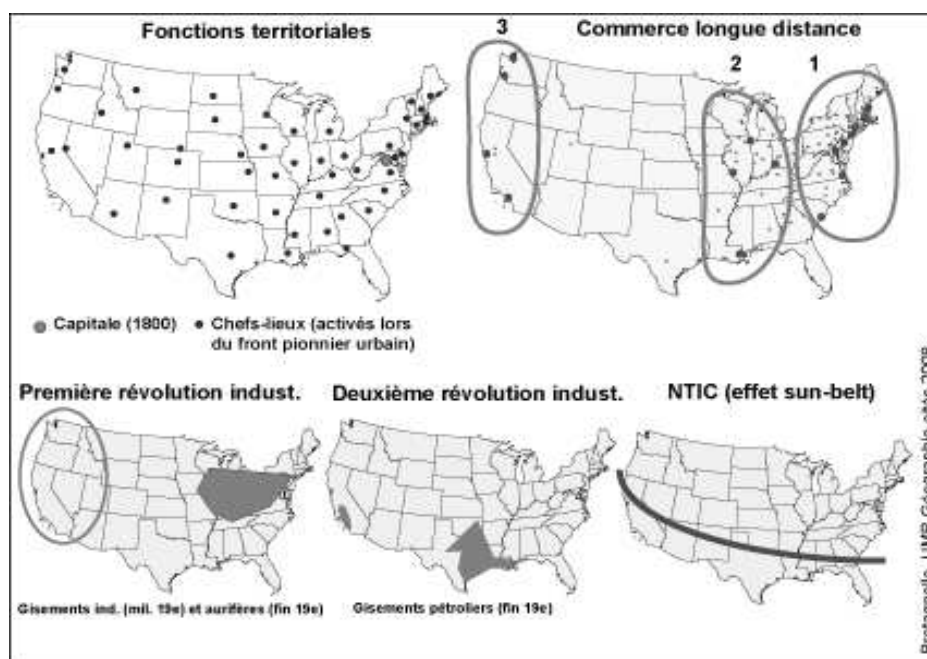


FIG. 4.7 – Localisations des fonctions territoriales et des gisements de ressources associés aux quatre fonctions CYCLE (Commerce longue distance, 1^{ère} et 2nde révolutions industrielles, NTIC) pour l'espace états-unien. Ces gisements doivent être intégrés comme des facteurs spatiaux influents dans le mécanisme émulant la compétition pour l'acquisition des innovations.

4.1.3 Généralisation : spécificité des modèles de simulation historique guidés par les données

Ces deux problèmes sont caractéristiques des modèles long-terme pour lesquels il est nécessaire d'injecter des données exogènes dans le modèle, pour tous les aspects qu'on veut prendre en compte mais qu'on ne cherche pas à expliquer (cf. chapitre 3 section 5). C'est le cas des modèles de l'archéologie qui cherchent à reproduire de façon stylisée des phénomènes sur de très longues durées [KGR05, AED⁺02], et pour lesquels on ne peut pas considérer qu'il existe des constantes sociales sur toute la durée simulée, contrairement aux constantes de nombreux modèles de simulation physique ou biologique. Pour palier à cette difficulté, il faut alors injecter des *séries de données* qui reflètent le contexte historique évolutif. Ainsi dans [AED⁺02], l'évolution des taux de natalité et de mortalité des indiens Anasazi de la Long House Valley dans l'Arizona est injectée, sans qu'ils ne viennent interférer avec les phénomènes générés (l'abandon de cette vallée par la population pour habiter d'autres territoires). On retrouve aussi cette utilisation d'un « trend » historique dans le modèle *UrbanSim* de [WBN⁺03], pour tenir compte des transitions économique et démographique auxquelles sont sujettes les métropoles dont le modèle simule le développement.

Nous pouvons voir cette injection de données comme un mécanisme de régulation, une commande du système simulé, qui permet de garder sa trajectoire dans une gamme de valeurs cohérentes pour la comparaison aux données réelles, sans pour autant dénaturer les mécanismes simulés.

4.1.4 Solution développée : des *dictionnaires imbriqués* pour exprimer le contexte spatio-temporel

Front Pionnier. Pour respecter les contraintes de l'avancée du front pionnier, le mécanisme global d'activation des villes dans l'espace et dans le temps articule événements discrets et processus aléatoire. Il s'appuie sur les possibilités d'ordonnancement mixte de *Simpop2*, vues dans la section 2.1. Ainsi :

1. pour les agents dont on souhaite contraindre la date d'apparition, l'envoi du message les activant est enregistré à la date fixée par les géographes dans le fichier d'initialisation de l'application ;
2. pour le reste de l'effectif d'agents à activer à chaque date, un tirage aléatoire sous contraintes est effectué. Les contraintes sont représentées par une structure de données qui associe période historique, espace géographique et effectif numérique. Cette structure est réalisée avec des *dictionnaires imbriqués*. Un *dictionnaire* est un ensemble de paires (clé-valeur), l'accès à chaque valeur se faisant au moyen de sa clé. Par généralisation, les clés et les valeurs peuvent être des objets quelconques. Un *dictionnaire imbriqué* est un dictionnaire dont les valeurs sont également des dictionnaires. Un tel dictionnaire imbriqué liant des périodes, des espaces et des valeurs est représenté sur la figure 4.8

Cette structure de données est encapsulée dans une classe **Front Pionnier** qui offre les opérations de lecture/écriture permettant de la manipuler. La trajectoire spatiale du front pionnier, et donc les données d'initialisation du dictionnaire imbriqué sont déterminées *a priori* par les géographes. Les polygones sont définis « à la souris » sur la carte, leur nombre de côtés est quelconque et déterminé suivant les besoins de précision des géographes. En l'état actuel du mécanisme leur conversion dans le système de coordonnées spatiales du simulateur nécessite un retraitement manuel.

Gisements. L'attribution des fonctions urbaines est le rôle de la classe **Innovation**, qui adopte le protocole *SP2Innovation*. De même que pour le paramétrage de la classe **Front pionnier**, nous demandons là aussi aux géographes de traduire leur connaissance de ce processus historique en des dictionnaires imbriqués associés aux fonctions *CYCLE*. Ces cartes sont ensuite intégrées à la classe **Innovation**. Les fonctions de tirage des villes recevant les fonctions *CYCLE* sont modifiées pour venir interroger ces nouvelles structures de données.

4.2 Ouvrir le système : fonction urbaine « mondiale » (<Obs, SVilles, Ports>)

Problème. L'application des deux mécanismes précédents s'avère insuffisant pour calibrer le modèle lors des premières phases du développement (1650-1850) [BP10]. La croissance endogène, cumulée à l'injection d'une part de croissance démographique historique observée, ne suffisent pas à générer les croissances des agents activés le long du front. A cette époque, les villes sont peu nombreuses et le marché intérieur est largement insuffisant pour générer seul la croissance des villes portuaires du grand commerce, passerelles entre le système des villes US et l'international (<Obs, SVilles, Ports>). Un nouveau mécanisme générant une croissance de population ciblée dans l'espace doit venir en complément de ceux existants, pour traduire cette croissance exceptionnelle des villes précurseuses dans chaque cycle d'innovation. Pour autant, les

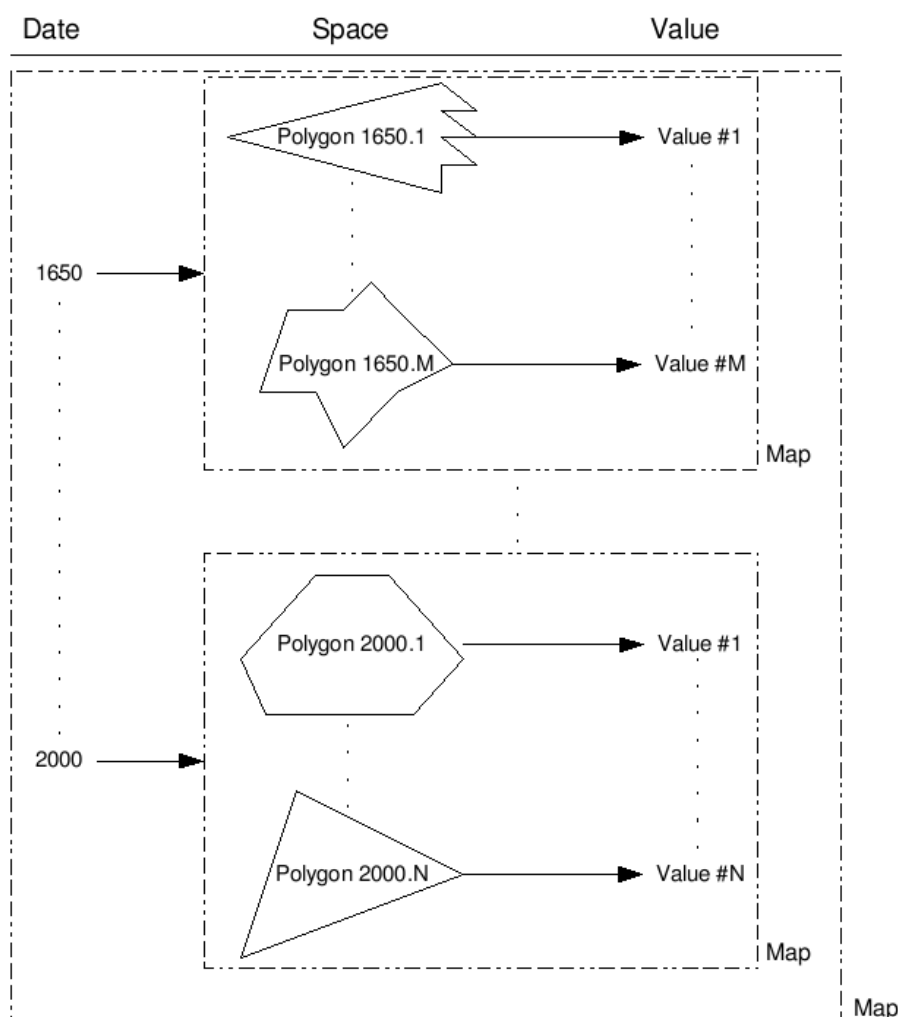


FIG. 4.8 – Des dictionnaires (*Map*) imbriqués sont utilisés pour représenter l'avancée d'un front pionnier, mais également les contraintes spatiales associées à la ventilation de l'innovation, pour les fonctions historiquement associées à des bassins de ressources. Un dictionnaire associe à chaque date une ou plusieurs zones de l'espace géographique. Dans notre cas ces zones sont représentées par des polygones. A chaque polygone est associé une valeur, qui dans le cas du front pionnier, correspond au nombre de villes à activer dans cette zone, à cette date.

géographes ne veulent pas complexifier le modèle et son analyse en ajoutant des villes extérieures aux Etats-Unis.

Solution développée. Pour représenter cette ouverture des villes à l'international, une *demande supplémentaire* en fonctions urbaines existantes (symbolisant la demande des villes hors des Etats-Unis) est introduite et ventilée spécifiquement sur les villes pionnières de chaque cycle d'innovation. Ce mécanisme se traduit par un paramètre supplémentaire associé à chacune de ces fonctions CYCLE. Il s'appuie sur l'une des trois composantes de la règle de croissance de population des villes entre deux pas de temps, donnée par la formule (pour une ville i)¹⁶ :

¹⁶le détail des autres termes est donné sur la page <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/rules.php>

$$P_i^{t+1} = P_i^t + (\Delta^1 P_i^t + \Delta^2 P_i^t + \Delta^3 P_i^t)$$

avec

$$\Delta^3 P_i^t = \beta^t \times \frac{\min(\Delta w_i^t; 0)}{W^t}$$

Ce troisième terme de la somme représente un retour de la croissance de la richesse de la ville sur la croissance de sa population. Il symbolise l'attractivité des villes s'enrichissant. $\Delta w_i^t = w_i^t - w_i^{t-1}$ représente le différentiel de richesse de i à t et W^t l'attractivité maximale dans le système à t . β^t est un paramètre permettant d'ajuster le poids donné à ce retour du marché sur l'attractivité et donc la croissance d'une ville. Sa valeur varie dans le temps. Si l'enrichissement est nul ce terme n'a aucun effet. L'enrichissement engendré par les ventes nécessaires à la satisfaction de cette demande supplémentaire est donc converti en augmentation de population. Un second paramètre de ce mécanisme, une *taxe douanière*, affecte plus spécifiquement la croissance de richesse (et donc de population) de quelques grandes villes associées à chaque CYCLE. Il symbolise les plus-values associées à la position de ces villes qui sont des « têtes de pont » dans les réseaux d'échanges internationaux.

Enfin la quatrième et dernière observation spécifique, **<Obs, SVilles, Transports>**, ne requiert pas l'ajout d'un mécanisme supplémentaire : elle peut être rendue par le paramétrage des fonctions urbaines existantes dans le modèle générique, en modifiant la trajectoire de leur paramètre *portée* pour la faire coller aux données dont disposent les géographes [BGM08].

5 Expérimentations avec l'application Etats-Unis, et généralisation

5.1 Situation initiale de référence

Le paramétrage de la trame fonctionnelle initiale de l'application Etats-Unis est défini sur les mêmes principes que pour l'application Europe : toutes les villes actives en 1800 reçoivent la fonction CENTRAL1 qui est celle de plus bas niveau dans la hiérarchie des fonctions du modèle. Quelques villes reçoivent CENTRAL2, elles sont choisies aléatoirement parmi les plus grandes. L'activation des villes dans le temps se fait selon le mécanisme de front pionnier présenté dans la section 4.1.4, les règles de diffusion spatiale des fonctions CENTRAL dans le modèle sont les mêmes que pour l'application Europe, et pour les fonctions CYCLE celle-ci se fait selon le mécanisme présenté en 4.1.4. Pour toutes les fonctions les dates d'activation sont celles données dans le tableau 1.

5.2 Résultats

Les résultats d'une première campagne de simulations avec les mécanismes implantés ont été présentés dans [BP10]. Nous mettons en avant les points les plus importants de la discussion qui en est faite :

1. Les mécanismes additionnels implantés ont pu être paramétrés de façon à reproduire fidèlement les propriétés hiérarchiques **<Obs, SVilles, H1>** et **<Obs, SVilles, H2>** pour le système des villes US (cf. table ??). La population totale du système a été ajustée de façon relativement fine (erreur de l'ordre de 5%).

2. Les trajectoires des plus grandes villes sont bien reproduites et on peut voir, en comparant les deux cartes de la figure 4.9, qu'à la date finale simulée les agents les plus grands de la simulation sont bien ceux qui représentent les plus grandes villes aujourd'hui. Les trajectoires des villes de l'ouest du pays sont moins bien simulées. Leur espacement rend difficile la reproduction de leur croissance au moyen des fonctions centrales basées sur un principe de proximité. La conséquence de cet échec à générer autant de grands agents que de grandes villes est que la hiérarchie simulée est plus inégalitaire que la hiérarchie observée (pour la meilleure simulation effectuée, le coefficient directeur de la droite d'ajustement de la distribution rang-taille est de 1.27 pour le simulé contre 1.21 l'observé)

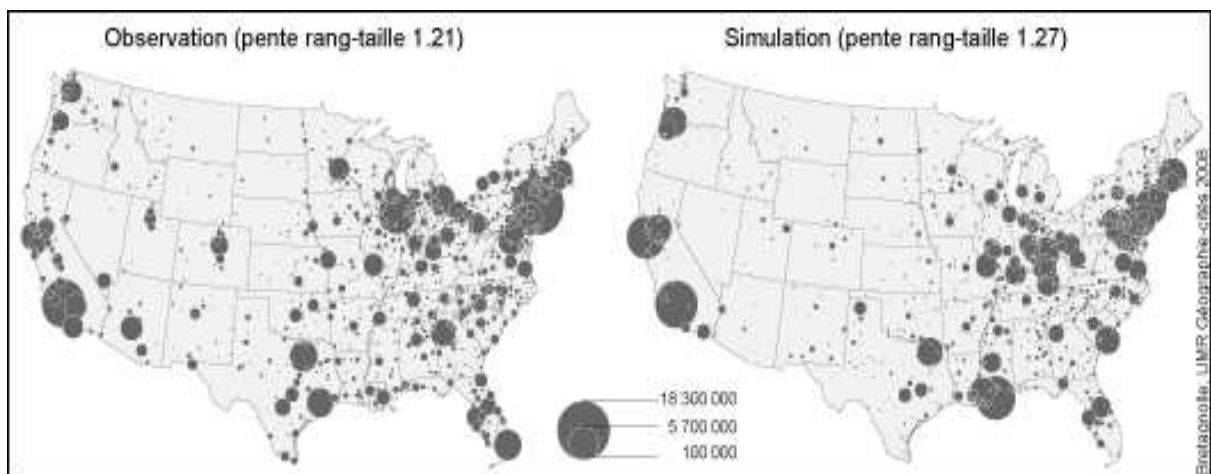


FIG. 4.9 – Les semis de villes observé (en 2000) et simulé par **Simpop2** (pas de temps final) pour les Etats-Unis.

La recherche de reproduction de la trajectoire historique de l'ensemble du système des villes, et non pas seulement d'une configuration à l'instant final, s'est traduite par un calibrage « chronologique » : les géographes cherchent d'abord à ajuster les paramétrages pour générer des premières phases de développement cohérentes avec les données. Lorsque ce n'est pas le cas, l'analyse de la simulation n'est pas poussée jusqu'à son terme, et de nouveaux paramétrages sont testés.

5.3 Généralisation des mécanismes implantés à d'autres espaces géographiques

L'application Afrique du Sud a été développée en parallèle de l'application Etats-Unis. Ces deux pays « neufs » présentent des propriétés communes [BPVM07] et ont vu tous deux leurs villes se développer de paire avec l'avancée dans le territoire d'un front pionnier. Notre ambition était donc, *mutatis mutandis*, de réutiliser pour Afrique du Sud les mécanismes implantés pour Etats-Unis.

La progression du front pionnier a été restituée avec la classe présentée dans la section 4.1.4. Les gisements associés aux fonctions **CYCLE** (cf. figure ??) et leur rôle dans la ventilation spatiale des innovations, ont été spécifiés à l'aide de dictionnaires imbriqués. Enfin le mécanisme de demande internationale (cf. section 4.2) a également été introduit.

Bien que l'expérimentation sud-africaine ait été moins poussée à ce jour, des premiers résultats ont tout de même déjà été présentés [BGL⁺08]. Un premier calibrage a permis de générer des développements avec de bonnes propriétés macroscopiques (population totale, structure hiérarchique) et des trajectoires d'agents réalistes (cf. figure 4.11). Ces premiers résultats confirment

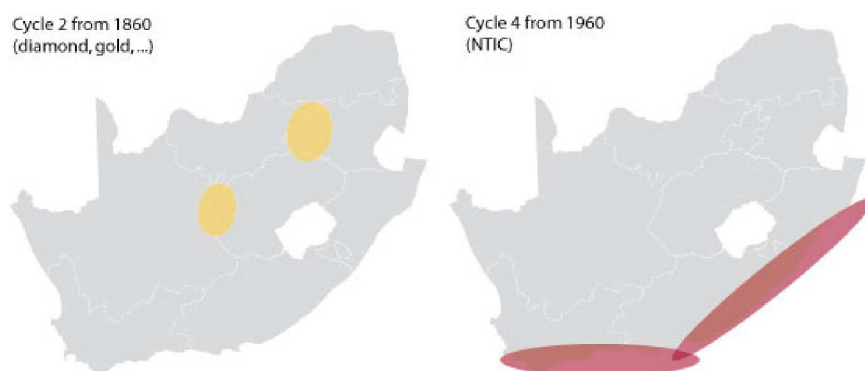


FIG. 4.10 – Gisements associés aux cycles d'innovation pour l'application Afrique du Sud

que le modèle augmenté de ces mêmes mécanismes « pays neufs », différemment paramétrés, permettent de reproduire les propriétés hiérarchiques universelles.

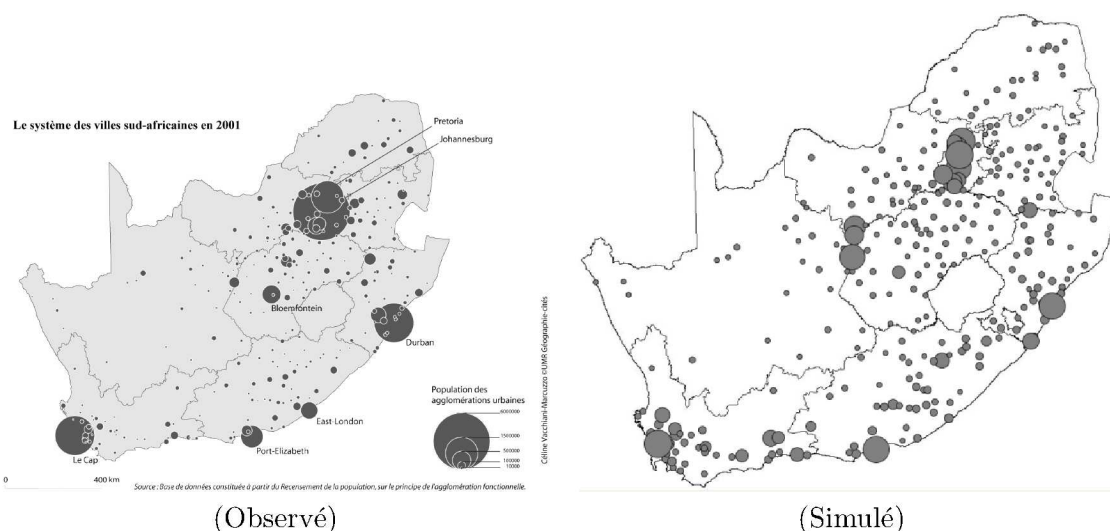


FIG. 4.11 – Les semis de villes observé (en 2000) et simulé (meilleur paramétrage trouvé) par Simpop2 (pas de temps final) pour l'Afrique du Sud.

Dans le second chapitre, nous avons posé la question : la théorie évolutionnaire urbaine, dans une expression computationnelle, permet-elle de reproduire un développement long-terme stylisé des systèmes de villes, qu'ils soient neufs ou anciens, à différents niveaux d'organisation du peuplement ? Les résultats agrégés dans les sections précédentes semblent répondre par l'affirmative : pour les trois territoires étudiés (Europe, Etats-Unis, Afrique du Sud), un calibrage, fait par essais et erreurs en lançant « à la main » de nombreuses simulations, a permis de converger vers des paramétrages qui simulent des développements en phase avec les données disponibles, à la fois sur des indicateurs macro-structuraux (population totale, répartition hiérarchique du peuplement) et sur des indicateurs micro-structuraux (trajectoires des villes au sein du système).

La question à laquelle ces campagnes d'expérimentation ont permis de répondre par l'affirmative est une *question d'existence* : « Existe-t-il un paramétrage des mécanismes qui permettent de vérifier l'hypothèse ? ». Une simulation ne peut répondre qu'à des questions de ce type. Elle est muette sur des questions plus ambitieuses du type : « Cette propriété P est-elle toujours vérifiée, quelle que soit la valeur de ce paramètre X ? ». Répondre à ce genre de *questions universelles*

peut être fait en :

- *raisonnant* sur le modèle, pour prouver P, mais nous avons vu que ce raisonnement est extrêmement difficile dans le cas de modèles complexes ;
- *calculant* le modèle pour toutes les valeurs de X, et vérifier si P est vraie dans tous les cas.

Si l'ensemble de définition de X est infini, le calcul exhaustif n'est pas possible. Cependant, si cet ensemble correspond à un paramètre continu et borné et que l'on peut s'assurer que le comportement du modèle varie continûment en fonction de ce paramètre, il est possible d'échantillonner X en faisant l'hypothèse que le comportement du système ne diffère pas qualitativement entre deux échantillons. Dans les deux cas, il est nécessaire de gérer un très grand nombre de simulations et d'analyser rapidement leurs résultats. C'est encore plus vrai si l'on prend en compte le caractère stochastique des modèles. Ce sont à des outils d'exploitation de modèles de simulation que nous allons nous intéresser dans les deux dernières sections de ce chapitre.

6 Outils d'exploitation existants

6.1 Définitions préalables

Dans la suite nous appellerons **simulation** un ensemble composé d'une ou de plusieurs exécutions (plusieurs runs) du simulateur avec le même jeu de valeurs des paramètres. Les modèles de simulation informatique intégrant souvent des mécanismes stochastiques, plusieurs exécutions du modèle avec un même jeu de valeurs de paramètres peuvent produire des résultats différents, si l'on fait varier la graine du générateur aléatoire. Il est donc très souvent nécessaire, soit pour simuler un phénomène naturel présentant une variabilité, soit pour évaluer la robustesse, d'exécuter plusieurs fois le modèle pour un même jeu de valeurs de paramètres.

Nous utiliserons donc indifféremment les mots **exécution**, **run** ou **instance de simulation** pour faire référence à une réalisation particulière d'une simulation. Deux exécutions d'une même simulation peuvent produire des sorties différentes si le modèle est stochastique.

Nous appellerons **expérience de simulation** ou plus succinctement **expérience**, un ensemble de simulations, associées à un seul et même jeu de paramètres, et prenant des valeurs de paramètres différentes. Dans une expérience, les valeurs de paramètres varient d'une simulation à l'autre selon un protocole défini. L'objectif associé à une expérience de simulation peut être par exemple l'optimisation d'une fonction par calibrage, ou bien l'exploration de l'espace des paramètres défini par l'expérimentateur.

Cette sémantique est représentée par le schéma entités-relations de la figure 4.12 [Rey09].

Nous présentons tout d'abord les outils d'exploitation utilisés, dont celui développé par B.Glisse au cours de sa thèse [Gli07], qui a été utilisé pour les expérimentations Europe et Etats-Unis exposées dans les sections précédentes. Nous pointons ensuite leurs lacunes, et montrons comment ils doivent être complétés par des outils dédiés au calibrage ; à l'expérimentation collective ; qui permettent des analyses modulables sur les données de sortie ; et enfin avec lesquels les experts puissent devenir rapidement autonomes.

6.2 Architecture logicielle et fonctionnalités des outils d'exploitation existants

Architecture client-serveur. Le code source et les exécutable des différentes applications de Simpop2 (Europe, Etats-Unis, Afrique du Sud, Eurosims) sont hébergés sur un serveur dédié

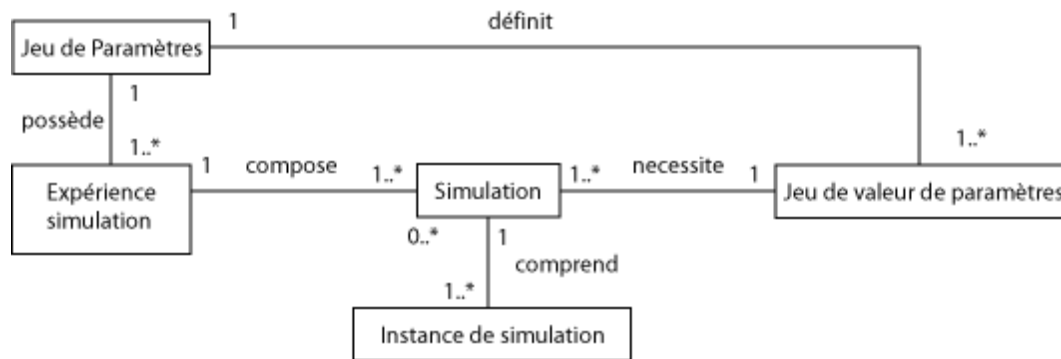


FIG. 4.12 – Diagramme entités-relations des concepts de l'expérimentation *in silico* (issu de [Rey09]).

qui autorise la connexion à distance de clients, installés sur les machines des géographes. Les simulations peuvent ainsi être lancées à distance. Une fois la simulation terminée, les fichiers contenant les sorties sont stockés sur un serveur web, d'où ils peuvent ensuite être téléchargés pour analyse par un client s'exécutant localement sur la machine de l'expérimentateur. Il n'y a aucune visualisation en direct, toutes les analyses se font en différé.

Pour se connecter sur le serveur d'application, paramétrer puis lancer les simulations, et pour exploiter les sorties produites par les applications *Simpop2*, les géographes disposent de deux outils :

1. Le *Navigateur Simpop*, une application cliente JAVA « tout-en-un » et multi-plateformes, développée par B. Glisse. Nous en présentons les fonctionnalités dans la section suivante. Elle permet d'analyser en détail le niveau *micro* (les trajectoires individuelles des villes), mais également de nombreux indicateurs *macro*.
2. Un ensemble de scripts d'analyses statistiques et spatiales écrits sous SAS¹⁷, développés par H. Mathian, statisticienne du projet. Pour des raisons de commodité, nous ferons référence à ces analyses sous le nom de *SimpopStats*. *SimpopStats* permet de produire des *rapports de simulation* contenant des analyses multi-niveaux. Il a été utilisé pour l'expérimentation avec Eurosim, mais n'a pour l'instant pas été utilisé pour les applications Europe et Etats-Unis.

Le Navigateur Simpop. Il permet de paramétrer une simulation, de la lancer, et de visualiser les sorties du modèle stockées dans un fichier au format HDF généré par le simulateur.

La figure 4.13 présente l'interface graphique lors du paramétrage d'une simulation de l'application Europe. On peut y voir :

- dans la barre latérale gauche, la liste des fonctions urbaines de l'application ;
- au premier plan, une « sonde » qui permet d'inspecter et de modifier les valeurs d'un objet du modèle, en l'occurrence la fonction *CENTRAL4*.

La figure 4.14 présente une capture d'écran de l'interface graphique lors de l'analyse d'une simulation de l'application Etats-Unis. On peut y voir :

- plusieurs onglets, dont l'un (celui visible) présente la carte du système à la date sélectionnée sur la *timeline*. Sur cette carte chaque ville est représentée par un cercle dont la surface est

¹⁷SAS (éditée par la société du même nom) est une plate-forme d'analyses statistiques très puissante mais propriétaire et payante, et dont les logiciels clients sont disponibles sous MS Windows uniquement

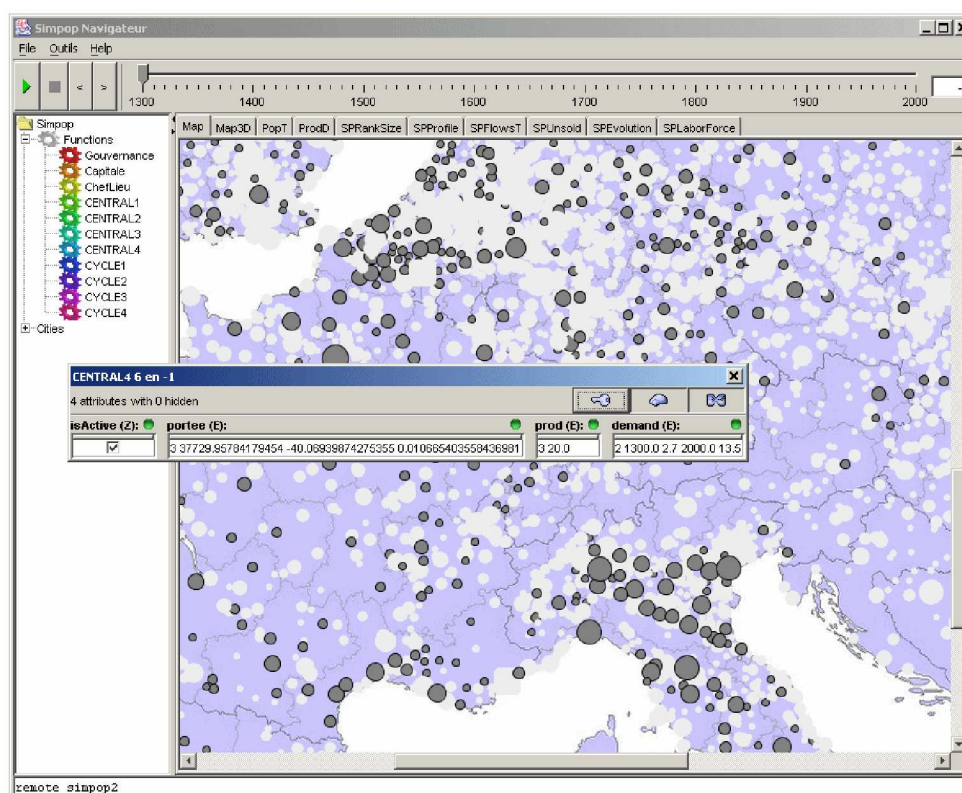


FIG. 4.13 – L'interface graphique du navigateur Simpop développé par [Gli07] et utilisée pour l'expérimentation des applications Europe et Etats-Unis

proportionnelle à sa population. On peut afficher/cacher les localisations d'une fonction urbaine et les réseaux d'échanges (cartes de flux) associées à celle-ci, pour chaque pas de temps, en la sélectionnant dans la barre latérale. Sur la figure 4.13, les villes possédant la fonction *CENTRAL2* en 1930 sont coloriées, ainsi que les flux à cette date des fonctions *CENTRAL2* et *CENTRAL4*

- les autres onglets permettent de visualiser l'évolution de plusieurs indicateurs macros pendant la simulation : la population totale (PopT), les productions et demandes totales (ProdD), la courbe rang-taille du système (SPRank-Size), l'évolution de la position hiérarchique des dix plus grandes villes du système (SPEvolution). Les autres onglets doivent recevoir des visualisations qui sont encore expérimentales et sujettes à des *bugs* récurrents d'actualisation d'une date à l'autre. Ils n'ont pas été utilisés pendant l'expérimentation sur les applications Europe et Etats-Unis.

Cette application permet une inspection exhaustive des données enregistrées pour une simulation et notamment une inspection très fine de l'état de chaque *ville* à chaque pas de temps. Elle a également permis aux géographes de déceler des *bugs* dans le code [Gli07]. Elle a été utilisée pour calibrer les modèles Europe et Etats-Unis, et par C. Schmitt pour la vérification externe de certains mécanismes du modèle [Sch08]. Les campagnes passées ont établi son efficacité pour expérimenter *simulation par simulation*.

SimpopStats. Par comparaison avec le *Navigateur*, utile pour calibrer le modèle, *SimpopStats* doit permettre de mener les géographes à une éventuelle « validation » du modèle. Il doit donc permettre de l'évaluer sur l'ensemble des critères retenus comme indispensables. Il sert en

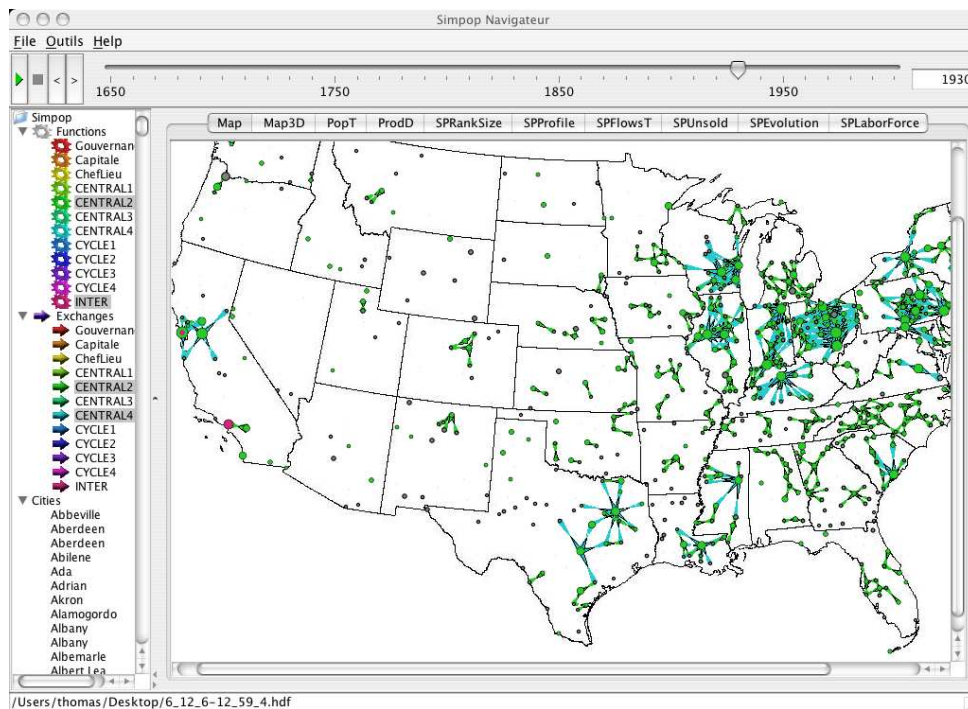


FIG. 4.14 – Interface du Navigateur Simpop en phase d’analyse d’une simulation. La carte affichée représente des flux d’échanges des fonctions urbaines sélectionnées dans la barre latérale gauche, à la date sélectionnée dans la *timeline*.

particulier à :

- tester la cohérence des règles introduites ;
- évaluer la capacité du modèle à générer des trajectoires réalistes relativement aux phénomènes observés ;
- mesurer la sensibilité du modèle à la situation initiale et aux changements de valeurs de paramètres.

SimpopStats consiste en un paquetage de fonctions d’analyses spatiales et statistiques sur les sorties de simulation, développées sous SAS, dont l’enchaînement est automatisé et produit un rapport en trois parties, contenant des analyses sur les niveaux *macro*, *meso* et *micro*. Les multiples niveaux *meso* regroupent une série de sorties à trois niveaux d’agrégation [SM08] :

- territoriale : des groupes de villes appartenant à une même région, à un même bloc (Europe de l’Est / de l’Ouest) ou à un même état ;
- hiérarchique : groupements de villes de même classe de taille, de façon à déterminer si il existe des effets systématiques dans leur évolution ;
- fonctionnelle : des villes partageant les mêmes fonctions.

Lancement d’expériences. Les deux outils présentés sont très performants pour expérimenter et analyser *simulation par simulation*. Il manque en revanche un outil pour automatiser l’expérimentation *par expériences*¹⁸. Il existe un script qui permet d’enchaîner l’exécution de plusieurs simulations,

¹⁸Il faut comprendre cette expression selon le sens que nous lui avons donné dans la sous-section 6.1).

mais son utilisation est laborieuse : l'utilisateur doit d'abord éditer « à la main » autant de fichiers de paramètres que de simulations qu'il souhaite effectuer, puis créer un fichier « maître » dont les lignes correspondent aux URL de ces fichiers de paramètres. En outre, aucun outil ne propose d'analyses comparatives entre plusieurs simulations, par exemple sur la base d'un score résumant la capacité de chacune à reproduire fidèlement une propriété dynamique du système des villes simulé.

6.3 Limites des outils d'exploitation existants de *Simpop2*

Le tableau 3 présente treize limites que nous avons identifiées, et que nous avons classées en cinq catégories. Nous reprenons les notations utilisées dans le second chapitre pour spécifier les différences entre systèmes urbains. Chaque limite est identifiée par une étiquette de la forme **<Lim, X, Y>**, où X désigne sa catégorie et Y est un terme synthétique pour l'individualiser. Ces codes nous permettent d'y faire référence rapidement dans la suite.

Type de limite	Nom et description de la limite
Documentation et communication	<Lim, Doc, Equipe> A l'intérieur de l'équipe, le formalisme UML a été retenu pour documenter le modèle et les outils mais très peu de documentation a été produite. Il n'y a pas de documentation d'un niveau intermédiaire entre celle, « sémantique », produite par les géographes sur les règles du modèle d'une part, et les commentaires intégrés au code d'autre part. Par exemple pour les algorithmes compliqués de fonctionnement du marché d'échanges des fonctions urbaines, il n'y a pas d'algorithmes en pseudo-code comme référence intermédiaire entre les schémas illustrant le principe du mécanisme, et les multiples fonctions qui l'implémentent, souvent très peu documentées et peu expressives.
	<Lim, Doc, Extérieur> Il n'y a pas de documentation organisée, harmonisée, et à un niveau de détail ad-hoc pour la communication du modèle et de ses applications à l'extérieur.
Maintenance et cohérence	<Lim, Cohérence, Analyses> L'évolution en parallèle et à des rythmes différents de l'expérimentation sur les quatre applications (Eurosim, Europe, Etats-Unis, Afrique du Sud), chacune pilotée par des géographes différents, produit des différences dans les protocoles d'analyse des sorties mis en place.
	<Lim, Cohérence, Code> La duplication du code dans son intégralité pour chacune des applications de <i>Simpop2</i> , et les calendriers différents de ces applications, ont pu aboutir à des versions concurrentes des mécanismes censés être génériques et donc identiques pour toutes les applications. Cela risque de violer la méthodologie comparative retenue.
	<Lim, Maintenance, Code> La taille du <i>Navigateur Simpop</i> (30.000 lignes environ de code Java), le contexte de son développement (un seul développeur pendant 4 ans, qui a quitté le projet depuis), et l'absence d'une documentation structurée rendent la maintenance et l'évolution de ce programme difficiles voire inenvisageables. Le savoir-faire encapsulé dans un code non documenté risque d'être perdu.

Expérimentation	<p><Lim, Exp, Workflow> Pour l'expérimentation <i>simulation par simulation</i>, le <i>workflow</i> n'est pas complètement automatisé : les géographes doivent enchaîner « à la main » les étapes successives (édition du fichier de paramètres, lancement, récupération du fichier résultat sur serveur web, ouverture sous le navigateur).</p>
	<p><Lim, Exp, Lots> Pour l'expérimentation par <i>expériences de simulations</i>, aucun des clients ne permet de lancer un lot de simulations dont l'enchaînement serait automatisé, pour faire des analyses de sensibilité/robustesse, ou guidé par un objectif de calibrage sur un critère bien défini.</p>
	<p><Lim, Exp, Format E/S> La structure des fichiers texte définissant le paramétrage d'une simulation est obscur pour les géographes, car non auto-descriptive. En dépit des avantages du format HDF (stockage facilité de données hiérarchiques, stockage des résultats par date de simulation), stocker les sorties dans ce format est limitant, parce que celui-ci est peu répandu, qu'il n'est pas supporté par les outils des géographes, et que son exploitation requiert nécessairement le <i>Navigateur Simpop</i>, lui-même difficilement maintenable (cf. <Lim, Maintenance, Code>). De plus pour lancer les scripts d'analyses spatiales et statistiques un filtrage et un export préalables, vers des fichiers texte, sont requis. Cet export doit être fait « à la main » depuis le <i>Navigateur Simpop</i>. Ajoutons que les entrées/sorties ne sont pas stockées sous une forme géolocalisée, ce qui empêche leur visualisation dans un SIG. Enfin, l'hétérogénéité des formats implique une multiplication des compétences du côté des utilisateurs, qui elle-même implique un coût temps et des risques accrus d'erreurs lors des conversions entre formats.</p>
	<p><Lim, Exp, Historisation> Il n'existe pas d'outil capable d'archiver automatiquement, et selon des spécifications communes définies collectivement, les paramètres, les données de sortie des simulations et leur analyses. Sans spécifications et sans un lieu de dépôt communs, chaque géographe archive sa démarche d'expérimentation en local (sur sa machine), avec sa propre dénomination. Il n'y a pas moyen de savoir, lors d'une nouvelle expérimentation, si une simulation a déjà été effectuée auparavant, sauf à passer par l'interrogation individuelle des expérimentateurs dans le laboratoire. Pour l'application <i>Eurosim</i> par exemple, où une simulation coûte plus de 20 minutes de temps processeur sur une machine dédiée, limiter la redondance est important.</p>
Analyses	<p><Lim, Analyses, Modularité> Les rapports produits par <i>Simpops-tats</i> ont une structure fixe et identique pour toutes les applications. Le nombre des analyses et des graphiques, ainsi que leur ordre d'apparition dans les rapports, sont figés.</p>
	<p><Lim, Analyses, Extensibilité> L'évolution des rapports pour y inclure de nouveaux indicateurs et/ou graphiques requiert le développement de nouvelles macros ad-hoc, et donc la maîtrise de SAS. Cette compétence n'est pas répandue parmi les géographes expérimentateurs.</p>

Autonomie	<Lim, Autonomie, Portage> Parmi les fonctionnalités du <i>Navigateur Simpop</i> , les plus utilisées par les géographes (cartographie en couches, cartographie temporelle, tri et inspection fine des données d'un modèle relationnel ou objet) sont assurées par des logiciels de la communauté (Logiciels de cartographie, SIG) qu'ils maîtrisent déjà. Porter ces fonctionnalités sur ces outils entraînerait plus d'autonomie pour les géographes, ainsi que des possibilités nouvelles d'analyses, le tout pour un coût de développement et de maintenance moindre.
	<Lim, Autonomie, Liberté> Les analyses statistiques sont assurées par un logiciel propriétaire (et payant), soumis à une licence d'exploitation privative, qui doit être renouvelée tous les ans, et disponible uniquement sur des systèmes d'exploitation propriétaires, ce qui complique inutilement les aspects techniques de l'automatisation de la chaîne des traitements de l'expérimentation. De plus son équivalent libre, R , s'interface facilement avec les SGBD et SIG libres.

TAB. 3: Descriptions des limites des outils d'exploitation de Simpop2 existants, regroupés par type de limite.

6.4 Besoin d'outils complémentaires

Les limites identifiées peuvent à nouveau être séparées entre :

- celles qui peuvent être franchies par un transfert de fonctionnalités déjà existantes (assurées par le *Navigateur Simpop* ou *SimpopStats*) sur d'autres outils plus performants dans l'optique de faciliter l'automatisation du *workflow*, d'allonger leur maintenabilité, et d'améliorer l'autonomie des experts et leur liberté ;
- celles qui requièrent le développement de nouveaux outils possédant de nouvelles fonctionnalités.

L'identification de ces limites nous a amené à initier la conception et la réalisation d'outils d'exploitation complémentaires qui tentent de les dépasser. Ces outils sont pour la plupart encore à l'état de prototypes, mais ils sont fonctionnels et leur existence témoigne de la faisabilité de l'approche proposée. Ce sont les fruits de ce travail, mené en tandem avec Sébastien Rey dont j'ai encadré le stage de Master 2, qui sont présentés dans la section suivante. Pour une description technique plus détaillée des solutions mises en oeuvre, on pourra se référer à [Rey09].

7 Nouveaux outils d'exploitation développés

Les deux campagnes de simulation sur Europe et Etats-Unis ont mis en lumière les difficultés de la pratique expérimentale sur des modèles ambitieux mais complexes. Ces difficultés entraînent un besoin de normalisation et de systématisation dans l'expérimentation *in silico*. Nos efforts ne doivent donc pas porter sur le seul cas particulier de *Simpop2*, mais s'inscrire dans un projet de plus grande envergure et de plus long terme, qui vise à offrir aux géographes un ensemble d'outils interopérables, dont l'action commune pousse plus loin l'automatisation du processus

d'expérimentation, et qui surtout soient *neutres* par rapport aux modèles qu'ils permettent d'exploiter. **Simpop2** et son application **Etats-Unis** nous serviront de banc de test, mais notre objectif est bien sûr que ces outils puissent également servir à exploiter les futurs modèles développés au laboratoire.

Dans la suite de cette section nous présentons tout d'abord ces outils compagnons de **Simpop2** de façon indépendante, puis nous évoquons leur articulation pour constituer un système d'exploitation de modèles.

7.1 Interfaçage d'un modèle avec des bases de données spatiales pour pouvoir l'exploiter depuis un SIG

Limites attaquées

- <Lim, Exp, Format E/S>
- <Lim, Exp, Lots>
- <Lim, Exp, Historisation>
- <Lim, Autonomie, Portage>

Besoins Le nouveau format de données doit à la fois combler les lacunes de l'ancien et participer à une amélioration du *workflow*. Il doit répondre aux besoins suivants :

- Etre commun aux entrées et sorties du modèle ;
- Permettre l'expression d'informations spatialisées ;
- Etre assimilable rapidement, si possible être déjà connu par une partie de l'équipe **Simpop2** ;
- Etre standardisé et aussi répandu possible, pour ne pas fermer la porte à l'exploitation des données par des outils de la communauté scientifique ;
- L'augmentation des volumes de données à stocker, entraînée par l'automatisation de l'enchaînement des simulations, doit être compensée par de la compression ;
- Etre partageable, pour capitaliser les résultats de simulations entre les différents membres de l'équipe et simplifier leur ré-exploitation, et supporter un historique des données à spécification équivalente ;
- Etre « souple » car utilisé par des applications qui se différencient par leurs mécanismes et potentiellement par la structure des états du système simulé. Le format doit permettre de stocker des types de données hétérogènes, mais également la définition de nouveaux types de données.

Contraintes

- L'outil de sauvegarde dans des fichiers HDF doit continuer à fonctionner en parallèle, afin de pouvoir continuer à utiliser le *Navigateur Simpop* pour l'analyse microscopique d'une simulation ;
- Les séquences de lecture/écriture des données doivent respecter l'ordonnancement existant, le déploiement d'une autre approche entraînant une complexification inutile du code ;
- Les opérations de sauvegarde doivent s'intégrer sous une forme qui se rapproche le plus possible d'une bibliothèque outil, en vue d'être par la suite factorisées en un module de sauvegarde indépendant du simulateur avec lequel on le fait travailler ;

- La bibliothèque standardisée doit se greffer sur toutes les applications de *Simpop2*, et offrir une interface normalisée aux outils extérieurs ;
- Dans un souci de performance, cette bibliothèque doit être écrite avec le langage du simulateur, donc en Objective-C ou directement en C.

Solution développée Le format et l'outil retenu est le SGBD *Postgis*, qui présente les avantages suivants :

1. il est une extension spatialisée du SGBD libre *Postgresql*, auquel il ajoute des fonctions facilitant la manipulation et l'interrogation de données spatiales ;
2. il dispose d'une interface directe avec les SIG libres, comme *GRASS* ou *QGIS* ;
3. avec la librairie *PQ*, il dispose d'une interface en langage C ;
4. c'est un logiciel libre, gratuit, soutenu par une importante communauté d'utilisateurs qui le maintient et le documente ;
5. il supporte les modèles de données relationnel et objet.

La librairie de gestion des entrées-sorties développée est proposée comme un module supplémentaire activable à l'invocation du programme, mais sa présence n'est pas obligatoire pour exécuter des simulations. Elle permet de gérer la gestion des connexions et la manipulation de données génériques avec *Postgis*. Pour cela elle s'appuie sur la librairie C *LIBPQ*, qui propose des primitives de haut niveau pour interfacer un programme avec des bases de données *PostGis/PostgreSQL* : connexions et déconnexions, gestion des transactions par *commit/rollback*, etc.

Le prototype réalisé a été testé sur l'application Etats-Unis. Il est à présent possible de visualiser directement ses sorties dans un SIG libre, *Quantum GIS*, capable d'ouvrir des couches sur le SGBD *PostGis*. La figure 4.15 représente l'interface de *QGIS* après ouverture de la base, on y voit le semis des points représentant les agents de la simulation.

Cette solution participe également à l'automatisation du *workflow* et à l'historisation des simulations dans des bases de données, dans la mesure où en plus des sorties, les données d'entrée et les paramètres sont stockés dans la BD et y sont dorénavant lus par le simulateur.

7.2 Intégration d'un wiki d'expérimentation

Limites attaquées

- <Lim, Doc, Equipe>
- <Lim, Cohérence, Analyses>
- <Lim, Exp, Historisation>

Besoins L'évolution en parallèle de l'expérimentation des applications de *Simpop2* a produit des décalages non désirés dans les protocoles d'analyse des sorties (cf. <Lim, Cohérence, Analyses>). Aux difficultés entraînées par ces divergences de calendriers, difficilement maîtrisables, auxquelles viennent s'ajouter celles inhérentes au dialogue de chercheurs aux origines disciplinaires variées, viennent se superposer les difficultés de communication entraînées par la *diversité de rôles* (« Guide », Expérimentateur, Analyste, Développeur, etc.), et de façon transversale la *diversité des niveaux de « culture de l'expérimentation »* (débutant, confirmé, expert). Ce constat est extrêmement général, et ces difficultés probablement inhérentes à tout projet d'ingénierie ou

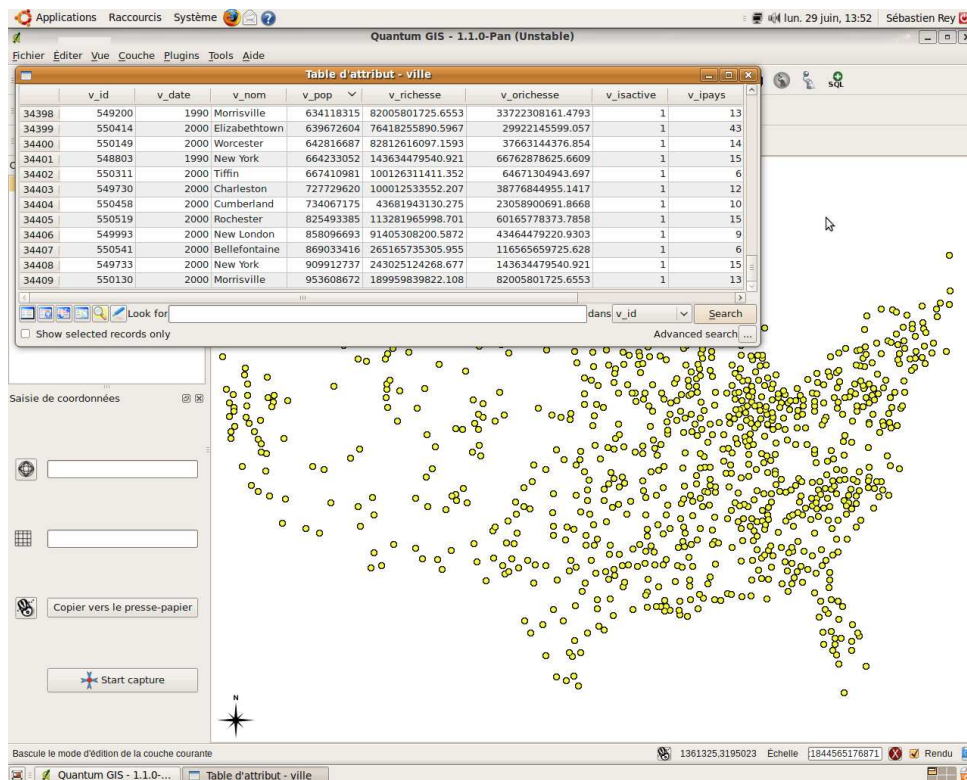


FIG. 4.15 – Interface du *front-end* QGIS au SIG GRASS, lors de l'ouverture d'une table contenant les données d'une simulation géo-référencée de l'application Etats-Unis de Simpop2.

de recherche collective et pluridisciplinaire. L'harmonisation et le travail collaboratif nécessitent l'organisation de réunions.

Nous postulons que dans le cas qui nous intéresse, l'expérimentation collective peut avancer plus efficacement avec un outil partagé, permettant un dialogue décentralisé et asynchrone sur les expériences en elles-mêmes, mais également sur le processus d'expérimentation. Cet outil jouerait en quelque sorte le rôle d'un *tableau noir* dont les géographes seraient les experts. Il devrait remplir les besoins suivants :

- Mutualiser les informations associées aux expérimentations ;
- Conserver l'historique des échanges entre participants ;
- Permettre de construire progressivement un langage commun, une ontologie de l'expérimentation, en explicitant le vocabulaire et les raisonnements ; Ces résultats doivent être nommés, présentés et structurés selon une spécification commune établie avec les représentants des différentes disciplines présents dans l'équipe ;
- Rendre disponibles les informations sur les simulations effectuées (Qui ? Quoi ? Quand ? Pourquoi ?) à tous les utilisateurs de l'équipe, depuis n'importe quel poste relié au réseau ;
- Tous les utilisateurs doivent avoir la possibilité d'enrichir à tout moment les simulations de commentaires, et de suggestions d'orientations, à la fois visuels et textuels.

Contraintes Un outil venant remplir ces besoins doit en plus :

- Supporter de larges volumes d'informations, stockés si possible dans une base de données ;

- Disposer d'une interface de programmation (API) permettant l'automatisation des ajouts, modifications, suppressions de données ;
- Disposer d'une API ou à défaut d'un logiciel compagnon permettant de rapatrier des données depuis la base contenant les sorties des simulations, ou depuis un répertoire de dépôt (rapports de simulation contenant le résultat des exécutions de scripts d'exploitation des sorties) ;
- Etre installé sur un poste serveur Linux, disposant d'un SGBD.

Solution développée L'outil le plus à même de répondre à ces attentes est un wiki. L'idée de lier un wiki au simulateur pour y archiver les rapports de simulation et l'évolution de l'expérimentation, et faire progresser collaborativement l'expérimentation *Simpop2* est due à Sébastien Rey, qui l'a également implantée. Nous avons choisi la plate-forme MediaWiki¹⁹ pour les raisons suivantes :

1. c'est un logiciel libre, qui est utilisé notamment par l'encyclopédie *Wikipédia*. Cela nous inspire confiance quant à la pérennité de l'outil.
2. il est reconnu pour sa capacité à gérer d'importants volumes de données (Wikipédia en étant probablement le meilleur exemple).
3. il dispose d'une interface de programmation en Python bien documentée et fréquemment mise à jour, ce qui nous permet d'automatiser la communication du simulateur vers le wiki pour créer, ajouter et supprimer des rapports de simulation contenant du texte, des images, des vidéos, à l'aide de « robots » programmés en Python.

Pour tester la faisabilité du projet, un premier prototype d'un tel robot à été développé. Il utilise la bibliothèque *PyWiki* qui propose des templates de robots standards pour *MediaWiki*. Notre prototype est capable de déposer sur le wiki des « éléments » de rapports (cf. figure 4.16). Ces éléments de rapport, par exemple des graphiques rang-taille (cf. 4.17), sont produits par un script contenant des instructions d'exploitation des sorties de *Simpop2* stockées dans les bases de données. Ces instructions sont formulées dans une syntaxe que nous allons présenter dans la sous-section suivante.

7.3 Un langage de script pour la composition de rapports de simulation modulaires et extensibles

Limites attaquées

- <Lim, Analyses, Modularité>
- <Lim, Analyses, Extensibilité>
- <Lim, Autonomie, Liberté>

Besoins *SimpopStats* permet la création pour chaque simulation, d'un *rapport de simulation* qui présente une compilation d'analyses statistiques sur les sorties, après une phase d'extraction et de retraitement qui n'est pas totalement automatisée. Chaque analyse correspond à un point de vue établi par les géographes pour éclairer les résultats du scénario mis en œuvre à travers le paramétrage.

Les besoins sur cette partie sont décomposables en deux points successifs :

¹⁹<http://www.mediawiki.org/wiki/MediaWiki/fr>

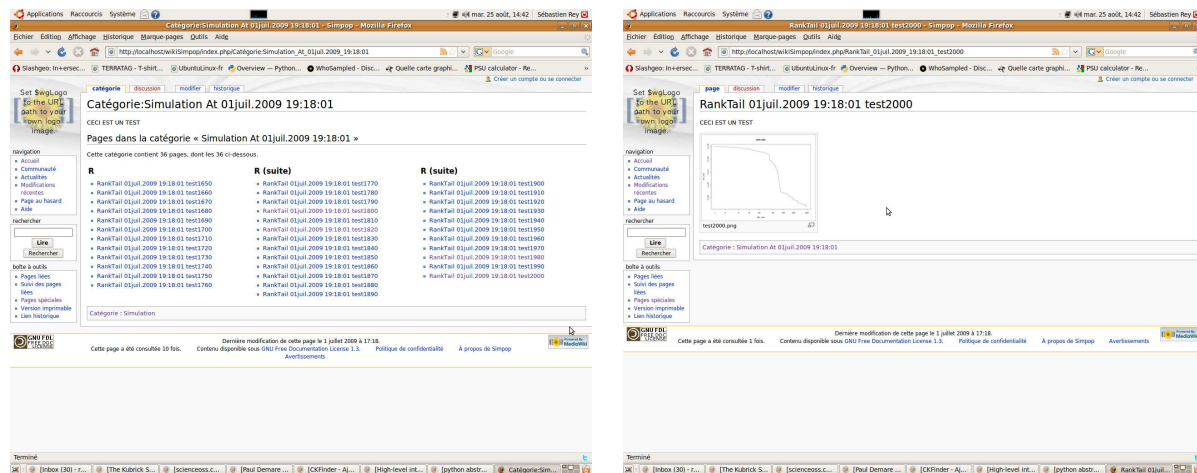


FIG. 4.16 – *Snapshots* du wiki d'expérimentation après ajout par un robot *Python* d'éléments de rapports de simulation, élaborés avec *R* et à partir de données issues dans la base de données spatiale.

1. une traduction préalable des fonctions SAS existantes et incluses dans les rapports actuels, pour les transférer sur le nouveau logiciel de statistiques choisi.
2. modulariser la création des rapports en fin de simulation. Pour cela il s'agit :
 - (a) de développer une interface qui permette à l'utilisateur de décider de la structure de ces rapports.
 - (b) d'ouvrir ces rapports à l'ajout de nouvelles analyses mises au point par l'utilisateur lui-même. Cela implique une solution qui soit, du point de vue de l'utilisateur, moins coûteuse à maîtriser que le langage de programmation de la plateforme statistiques choisie, et surtout plus expressive.

De plus, nous cherchons à :

- passer d'un outil tournant sur un poste local à un outil centralisé, afin de limiter la dispersion des connaissances et empêcher la création de versions concurrentes des codes sources utilisés pour la production des rapports de simulation ;
- séparer nettement l'outil de gestion des données et l'outil de création de rapports. Ce sont deux fonctionnalités différentes, et la gestion de données mérite un composant dédié (cf. sous-section 7.1).

Contraintes. La plateforme de traitements statistiques venant remplacer SAS doit :

- être un logiciel libre et multi-plateforme ;
- disposer d'une large palette de bibliothèques et d'interfaces utilisateur étendant librement les fonctionnalités premières du logiciel ;
- proposer en particulier un interfaçage possible avec un SIG (pour faciliter les lectures/écritures de données).

L'abandon définitif de *SAS* dans la chaîne de traitements de *Simpop2* impose comme préalable de lui trouver un remplaçant libre, offrant des traitements statistiques au moins équivalents à ceux utilisés dans les rapports actuels. Ces fonctionnalités incluent la capacité à produire une

large palette de fonctions et de graphiques, un mode console, un support de nombreux formats de fichiers, une communauté d'utilisateurs active et une bonne documentation, et enfin un suivi régulier par le distributeur du logiciel.

L'interface utilisateur permettant de décider de la structure et du contenu des rapports doit quant à elle :

- permettre de constituer ses rapports comme une composition d'*éléments de rapports*, soit déjà existants et tirés d'une bibliothèque d'éléments, soit créés par l'expérimentateur ;
- permettre le pilotage entièrement en mode *batch* (non graphique) des rapports, pour être intégrée dans le *workflow* d'expérimentation ;
- permettre le développement de greffons à l'interface graphique du SIG, dans l'optique d'un pilotage complet de l'exploitation du modèle depuis le SIG. Ces composant graphiques seraient des « médiateurs » facilitant la composition de ces rapports uniquement à la souris.

Solution développée Pour le remplacement de SAS, nous avons choisi *R* qui, en plus de remplir tous les besoins exprimés²⁰, présente de surcroît les avantages suivants :

- *R* dispose de nombreuses bibliothèques qui permettent de le faire interagir avec les autres prototypes développés :
 1. une interface avec des bases de données *PostgreSQL (RDBI)* ;
 2. des extensions des outils de manipulation des données (*RESHAPE, PLYR*) ;
 3. une grammaire pour programmer la composition de graphiques (*GGPLOT2*) ;
- des interfaces qui permettent l'encapsulation des commandes *R* dans des langages plus structurés²¹. Cet aspect est nécessaire pour inscrire ce module dans une architecture logicielle plus ambitieuse.
- une interface avec un SIG (*GRASS* notamment) pour automatiser la cartographie des données spatialisées.

Un prototype, traduction d'un script SAS existant, a été réalisé. Il s'agit d'un script *R* commandé par un script *Python*. Lancé en ligne de commande, son exécution crée un graphique des courbes rang-taille pour toutes les dates de la période simulée 1650-2000 (cf. figure ??, à partir des sorties contenues dans la base de données (cf. section 7.1).

Ce prototype prouve la faisabilité des points suivants :

- une connexion à la base de données des sorties mise en place (cf. section 7.1) par le biais de l'interface proposée par *R (RDBI)*, mais également par celle proposée par Python (*PyGreSQL*) ;
- Python peut manipuler les objets et instructions *R* par le biais de la bibliothèque *RPY* ;
- la traduction d'analyses existantes SAS vers *R* est possible, une grande quantité de documentation technique est disponible sur ce sujet.

La volonté d'introduire de la modularité et de l'extensibilité dans la structure des rapports implique l'inutilité d'une traduction complète, « à la main », des scripts SAS existants vers *R*. L'étude de faisabilité réalisée avec le prototype nous confirme que *R* est une solution pour

²⁰logiciel libre multiplateformes ; à la fois langage de programmation et environnement de développement mathématique et statistique ; forte communauté d'utilisateurs dans le monde scientifique et géomatique ; ouvrages de référence récents.

²¹*Python* notamment, langage complet et orienté-objets

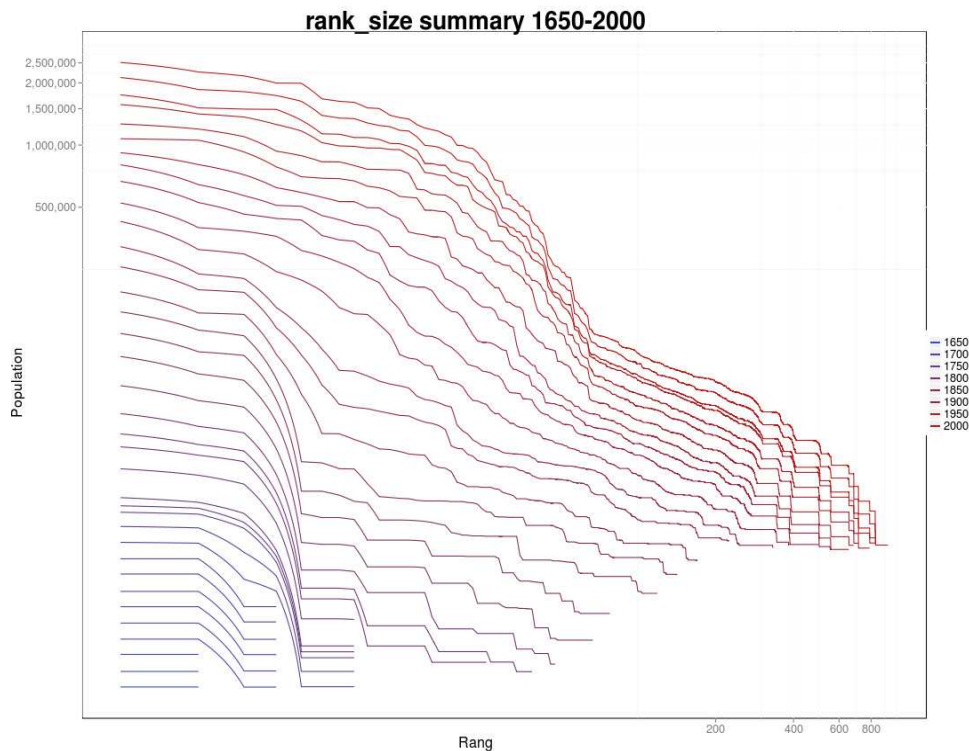


FIG. 4.17 – Rangs-tailles pour toutes les dates d’une simulation Etats-Unis sur la période 1650-2000. Généré par un script R, cet important élément de rapport illustre l’intérêt d’une transition vers R, et de constructeurs d’éléments de rapports qui peuvent être orchestrés par un script python.

construire les éléments de ces rapports. Pour spécifier ces *éléments de rapports*, nous avons initié la création d’un langage de script, qui permette d’exprimer des requêtes d’exploration multi-dimensionnelles :

- pour chaque simulation : parmi les objets de la simulation et leurs attributs, l’espace et le temps ;
- pour chaque expérience de simulation : parmi les simulations.

Il s’agit d’un problème difficile : pour définir des éléments de rapports, ce langage doit permettre de manipuler les objets du modèle simulé (agents, attributs, espace, dates), mais également des opérations ensemblistes (agrégation, sélection, hiérarchisation), des opérations statistiques (calculs de valeurs centrales, de mesures d’hétérogénéité, de classification), des opérations graphiques (tracé de courbes de fonctions, histogrammes).

En l’état actuel, ce langage de script n’en est qu’à ses balbutiements. La figure 4.18 donne une idée de la notation préfixée pour exprimer les éléments de rapport.

Un prototype du parser a été réalisé. Développé avec *PyParsing*²², il assure la transformation d’instructions du langage en une séquence de traitements sur les données contenues dans la base. Il produit un arbre XML valide d’une instruction respectant la syntaxe du langage. Les actions associées à chaque noeud de cet arbre restent à implanter.

²²<http://pyparsing.wikispaces.com/>

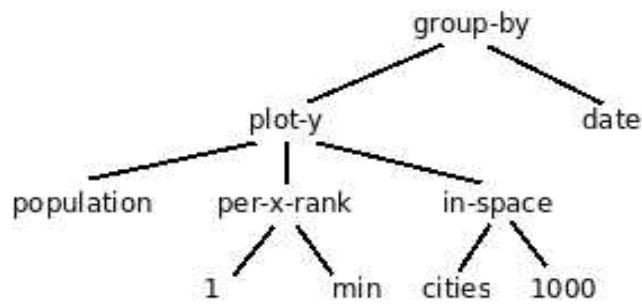


FIG. 4.18 – Arbre correspondant à l'instruction *group-by* ((*plot-y population per-x-rank (1,min) in-space (cities, 10000)*), *date*). Cette instruction trace, à raison d'une courbe pour chaque date de la simulation, l'évolution de la population des 1.000 premières villes comme une fonction de leur rang dans la hiérarchie.

Pour finir sur ce prototype, il est important de remarquer que cette solution est neutre par rapport aux données contenues dans la base. La conception de ce langage a été motivée par la volonté de produire un outil de reporting extensible sur les données de sortie des applications *Simpop2*. Mais il est neutre par rapport à la base de données dont il construit des rapports. Parmi les autres cas d'utilisation envisagés figurent les bases de données historiques sur les villes états-uniennes, européennes et sud-africaines conçues au laboratoire Géographie-Cités [BGM08].

7.4 Interfaçage avec des algorithmes de calibrage automatique

Limites attaquées

- <Lim, Exp, Lots>

Besoins Comme nous l'avons dit, le calibrage constitue souvent une étape épineuse dans les projets de simulation orientée agents, du fait du grand nombre de dimensions de l'espace des paramètres. Nous avons vu que le *Navigateur Simpop* et *SimpopStats* ne sont d'aucune aide pour libérer l'expert d'un travail fastidieux et répétitif de recherche des paramétrages permettant de se rapprocher de configurations désirées.

L'utilisation de techniques de calibrage automatique constitue une avancée réelle sur ces aspects. L'idée est d'aller plus loin que le simple enchaînement de simulations selon un plan d'expérience planifié *a priori*, en utilisant des techniques d'optimisation pour orienter le choix du prochain jeu de valeurs de paramètres à tester de façon à trouver le jeu de valeurs des paramètres qui optimise la valeur obtenue pour une fonction objectif. Un prérequis à l'utilisation de techniques d'optimisation est de scorer les simulations, de façon à traduire quantitativement la qualité des configurations spatiales générées.

Attribution de scores aux configurations spatiales simulées Plusieurs points de vue peuvent exister sur ce qui fait d'une simulation une « bonne » simulation. Dans une première approximation, le score peut par exemple :

- refléter la proximité des populations totales, simulée et observée, pour la situation finale ;
- refléter la proximité des pentes des courbes rang-taille, simulée et observée ;
- refléter de nombreux autres critères. . .

Ces seuls indicateurs constituent bien sûr un point de vue incomplet sur ce qui fait structure dans un système des villes. Cependant ces mesures sont cohérentes avec les objectifs assignés à *Simpop2*.

Chacun de ces scores est associé à la configuration spatiale globale du système de villes simulé à un instant donné. Ils peuvent être calculés à l'issue de chaque pas de temps du modèle. Dans un premier temps, nous ne nous intéressons qu'aux valeurs de ces scores à l'instant final. Par la suite, pour vérifier la capacité du modèle à produire un développement cohérent, nous devons nous assurer non plus uniquement de la cohérence à l'instant final, mais de la cohérence de la série temporelle de leurs valeurs. Il s'agit d'une question plus difficile que nous laissons en suspens pour l'instant et que nous aborderons dans le chapitre 5.

Nous pouvons donc regarder le calibrage comme un problème d'optimisation. Il s'agit d'un problème difficile, car dès que l'on souhaite raffiner un peu la fonction objectif en calibrant sur plusieurs aspects, celle-ci devient compliquée et n'a pas de bonnes propriétés (elle n'est pas continue, etc.). Quand le terrain est « accidenté », les algorithmes génétiques sont de bons candidats parmi les multiples techniques d'optimisation existantes. De plus, un autre argument en leur faveur est que la construction d'algorithmes d'optimisation de type génétiques, spécifiques à des modèles à base d'agents, a été l'objet d'une thèse récente effectuée dans notre équipe (LIS), avec des applications à des modèles simples de colonies de fourmis sous Netlogo [Cal07, CH05].

Algorithmes génétiques Le principe général de fonctionnement d'un algorithme génétique²³ est représenté par la figure 4.19. Une *population* d'instances du modèle est instanciée avec des valeurs de paramètres différentes. A l'issue des simulations, les jeux de valeurs ayant donné les meilleurs résultats au sens de la fonction objectif (appelée *fonction de fitness*) sont sélectionnés (on les appelle les « parents ») et sont combinés et *mutés* pour produire de nouveaux jeux de valeurs (phase de *recombinaison/mutation*), les « enfants ». On relance alors la simulation pour un jeu de modèles composé des « parents » et des « enfants », et ainsi de suite jusqu'à atteindre un critère d'arrêt de l'algorithme, qui correspond soit à l'obtention d'une valeur seuil de la fonction objectif, soit à l'exécution d'un nombre maximal de simulations défini par l'expérimentateur, soit encore à la convergence des valeurs de la fonction objectif.

Le calibrage automatique de modèles orientés agents pose des questions spécifiques, puisque pour chaque paramètre associé aux agents, le nombre de configurations possibles augmente de façon exponentielle avec le nombre d'agents du modèle. Disposer d'algorithmes efficaces dans ce domaine devrait contribuer aux développements de l'expérimentation *in silico* en géographie. Cette étape, au même titre que la définition de plans d'expérience rigoureux, l'analyse statistique en profondeur des sorties, ou l'adoption de normes et d'outils partagés par la communauté, constitue un pas important pour la professionnalisation de la pratique de la simulation en géographie.

Solution développée Nous disposons d'un ensemble d'algorithmes génétiques en Java développés par [Cal07] dans sa thèse, dont certains sont optimisés pour les modèles multi-agents. Les utiliser sur *Simpop2* permettrait de gagner un temps important pour défricher les premières phases d'une campagne d'expérimentation, en orientant les géographes vers des paramétrages générant des configurations ayant de bonnes propriétés macroscopiques. Pour cela, nous avons besoin de développer une interface graphique utilisateur permettant aux géographes de pouvoir lancer leurs expériences avec ces algorithmes. Cette interface a été réalisée par A. Monzie dans le cadre

²³Le nom fait référence à l'inspiration évolutionniste de ces algorithmes

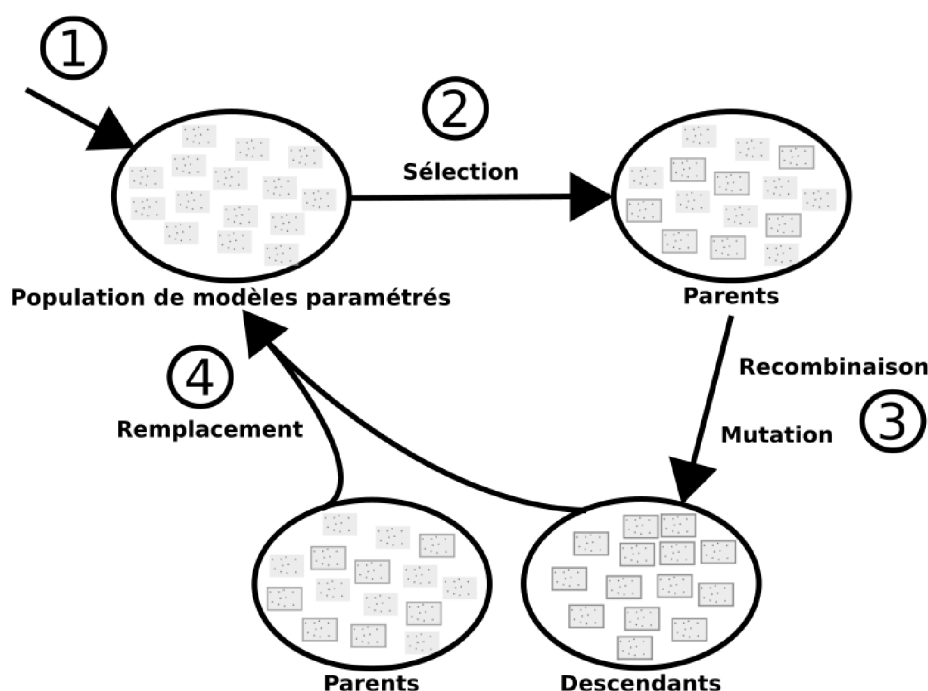


FIG. 4.19 – Principe général du calibrage automatique de modèle par des algorithmes génétiques (d'après [Cal07])

de son stage de seconde année à l'ENSIIE, que j'ai co-encadré. Le développement n'a pas été finalisé et les algorithmes n'ont pas encore pu être testés sur *Simpop2*.

7.5 Site web dédié

Limites attaquées

- <Lim, Doc, Extérieur>

Besoins Les géographes ont besoin d'une source de documentation unifiée, synthétique et élaborée collectivement, qui renseigne sur l'ancrage théorique du projet, sur le modèle générique à base d'agents, sur ses différentes applications, sur leurs résultats et sur les protocoles de validation multi-niveaux. Elle doit être une vitrine et une introduction pour un public international. Tout en proposant une synthèse et des liens vers du contenu déjà publié, elle doit également suivre l'actualité plus versatile du projet et donc pouvoir être rapidement mise à jour. Elle doit également héberger du contenu dont le format rend difficile la valorisation dans des articles. Elle doit faire connaître l'équipe *Simpop2* et les réseaux de recherche qui l'ont portée.

Solution développée Pour tenter de répondre à ces besoins, nous avons piloté la conception et assuré la réalisation du site web du projet, <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/>. Le plan du site a été élaboré et validé collectivement, tandis que l'édition du contenu a été réparti entre les membres de l'équipe. Nous avons proposé plusieurs templates aux géographes, nous avons assuré le travail de recensement, de formatage web, et de mise en ligne de ce contenu. La figure 4.21 présente des captures d'écran de pages du site.

Dans sa forme actuelle, le site est très « web 1.0 » et peu dynamique, il consiste en une vingtaine de pages en *HTML+CSS+PHP*. La limite évidente de notre solution est qu'elle ne rend

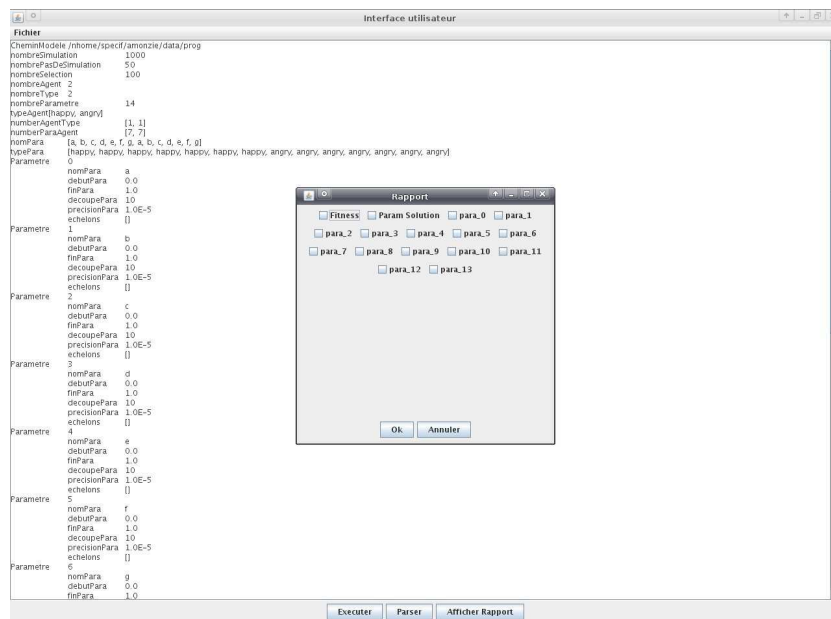


FIG. 4.20 – L’interface graphique réalisée par [Mon09] pour pouvoir calibrer un simulateur avec les algorithmes génétiques développés par [Cal07]. L’utilisateur peut paramétrer le calibrage en décidant des paramètres à faire varier et de leurs intervalles de valeurs, ainsi que du critère d’arrêt (nombre maximal de simulations atteint, ou nombre paramétré d’étapes sans amélioration de la valeur de la fonction objectif) Plusieurs modes de communication avec le simulateur sont possible (par fichier ou sur la sortie standard).

pas les géographes autonomes pour éditer le contenu et le publier par eux-mêmes directement sur le site. Dans la pratique, cette solution rend donc les géographes tributaires de la disponibilité d’un webmestre. Elle est très perfectible au vu des technologies actuelles du web collaboratif et de leur simplicité d’utilisation.

Ce site a été réalisé début 2007, avant que ne naisse l’idée d’un wiki branché au simulateur pour un archivage et un pilotage collectifs, distribués et asynchrones de l’expérimentation. A court terme, ces deux sources web doivent être fusionnées en un unique wiki dédié au projet, avec une partie publique constituée du contenu actuel du site web, et une partie privée dédiée au *work in progress*, accédée par les robots pour y déposer les rapports de simulation et par les expérimentateurs pour les visualiser, commenter, augmenter, tagger, etc.

7.6 Synthèse des outils développés et articulation

Le tableau 4 montre que des solutions ont été proposées pour chacune des treize limites que nous avons identifiées en inspectant la démarche et l’outillage utilisés. Nous avons décliné indépendamment cinq de ces solutions dans les cinq sous-sections précédentes, mais ces traitements n’ont véritablement d’intérêt que si ils sont enchaînés et orchestrés par un environnement de simulation, libérant l’expérimentateur d’un travail systématique. A l’heure actuelle des script Python assurent ce liant en ordonnant les étapes de la chaîne d’expérimentation, décrite par la figure 4.22.

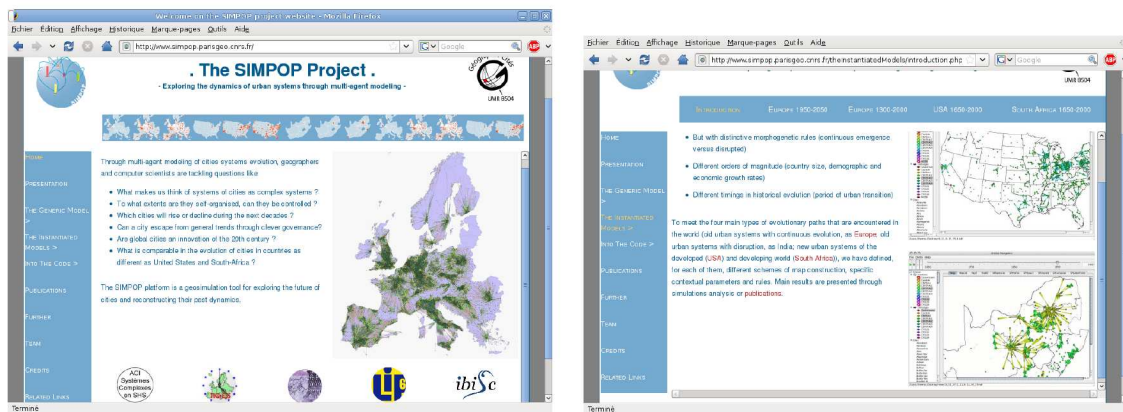


FIG. 4.21 – Page d'accueil du site web Simpop.

8 Conclusions du chapitre

Les deux applications développées sur le modèle générique Simpop2 ont été riches d'enseignements. En particulier les hypothèses formulées au chapitre 3, sur les morphogenèses des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis, ont pu être mises à l'épreuve.

L'ajout de trois mécanismes implantant les observations spécifiques faites sur les Etats-Unis a permis de mener une première campagne de simulations sur cette application, avec les mêmes outils d'expérimentation que ceux utilisés pour l'application Europe. La comparaison des résultats obtenus lors de ces deux campagnes montre qu'il est possible de trouver des paramétrages qui reproduisent les différences dans les modalités prises par les propriétés émergentes associées au niveau macro : on réussit bien à simuler des systèmes de villes de plus en plus inégalitaires avec le temps ($\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{H1} \rangle$), et un système états-unien plus inégalitaire que l'européen ($\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{H2} \rangle$).

Pour les géographes, le modèle conçu a été utilisé comme un filtre qui a permis de distinguer :

- les processus « universels », qui partout permettent de simuler des trajectoires de villes et des propriétés collectives émergentes
- les processus spécifiques au système américain. L'expérimentation sur l'Afrique du Sud, tout en étant moins aboutie à ce jour, a également renforcé l'hypothèse que ces processus sont communs aux « pays neufs ». Les mécanismes implantés pour les traduire génèrent bien des configurations dont les propriétés sont celles observées en général dans les systèmes de peuplement neufs, comme la distribution hiérarchique plus inégalitaire du peuplement entre les villes.

Mis ensemble, ces processus permettent de rendre compte du développement de 95% de la masse urbaine. Mais à l'intérieur de chacune des applications, des processus résistent encore à ce travail de régénération formelle. Ce sont :

1. ceux qui permettent de rendre compte de la macrocéphalie ;
2. ceux qui permettent de simuler le basculement Méditerranée-Mer du nord en Europe lors de la révolution industrielle.

Peut-on en trouver sans sortir du système ? Cette question reste ouverte.

Nous devons toutefois rester prudents quant aux conclusions qui peuvent être tirées des expérimentations menées jusqu'à présent sur ces trois applications, pour plusieurs raisons.

Limite identifiée	Solution développée
<Lim, Doc, Equipe>	Wiki d'expérimentation
<Lim, Doc, Extérieur>	Site web dédié
<Lim, Cohérence, Analyses>	Wiki d'expérimentation
<Lim, Cohérence, Code>	Hébergement du code sur un CVS (Launchpad)
<Lim, Maintenance, Code>	Documentation normée et balisée du code source et génération d'une doc HTML intégrant des diagrammes UML de base (Doxygen)
<Lim, Exp, Workflow>	SGBD spatial; Scripts (Python) liant les traitements
<Lim, Exp, Lots>	Interface graphique à des algorithmes de calibrage automatique de modèles à base d'agents
<Lim, Exp, Format E/S>	SGBD spatial
<Lim, Exp, Historisation>	Wiki d'expérimentation
<Lim, Analyses, Modularité>	Langage de script
<Lim, Analyses, Extensibilité>	Langage de script
<Lim, Autonomie, Portage>	SGBD spatial; Langage de script
<Lim, Autonomie, Liberté>	Utilisation de logiciels libres uniquement pour tous les prototypes développés

TAB. 4 – Tableau récapitulatif des solutions proposées pour les treize limites identifiées dans la démarche et les outils d'expérimentation de *Simpop2*.

La première est qu'un travail de *blackbox testing* mené par C. Schmitt²⁴, visant à évaluer la sensibilité des mécanismes de marché de *Simpop2* a montré que ces mécanismes sont très sensibles aux changements de valeurs des quelques paramètres de contrôle [Sch08]. Un travail de mesure approfondi dans cette direction, indispensable, reste à mené de front.

La seconde est qu'il existe d'autres paramètres, qui bien que n'étant pas assimilés à des paramètres dans le *modèle de conception*, et qui ne sont donc pas ajustables lors du lancement d'une simulation, sont des constantes dont la valeur a été sujette à ajustement pendant la campagne de simulations. Ces « paramètres cachés » incluent notamment les nombres de villes auxquelles attribuer une fonction innovante à une date donnée, ou les paramètres des algorithmes d'élection des villes à l'acquisition d'une nouvelle fonction²⁵.

En marge des résultats obtenus, l'outillage utilisé lors des campagnes d'expérimentation, tout en ayant permis une analyse très fine de chaque simulation, nous a semblé inadapté pour aller plus loin et pour s'attaquer aux problèmes qui, étant donné la complexité des règles du modèle qui rend impraticable un raisonnement analytique, nous oblige à une approche massivement calculatoire. Le coût humain associé à l'expérimentation avec les outils existants nous a paru très lourd (un géographe à plein temps pendant plusieurs mois pour chaque application *Simpop2* et un travail méticuleux de recensement non-assisté par l'outil).

Nous défendons l'idée que ce coût peut être allégé par une déconstruction de la démarche de l'expert et de ses processus décisionnels lors de l'expérimentation, afin d'en capturer des aspects systématiques. Cette déconstruction doit être suivie de propositions de solutions techniques

²⁴postérieur aux expérimentations présentées ici

²⁵Règles du type : « T % aléatoirement choisies parmi les plus grandes possédant la fonction F, et (100-T) % aléatoirement choisies parmi les U% les plus grandes »

permettant son automatisation. C'est ce que nous avons tenté de faire, en initiant plusieurs chantiers, qui nous semblent aller dans ce sens d'un meilleur outillage de la pratique expérimentale *in silico* en géographie. Les prototypes développés et exposés constituent les fondations d'une architecture de plus grande envergure qui reste à construire. Nous revenons sur ces points dans la conclusion du manuscrit.

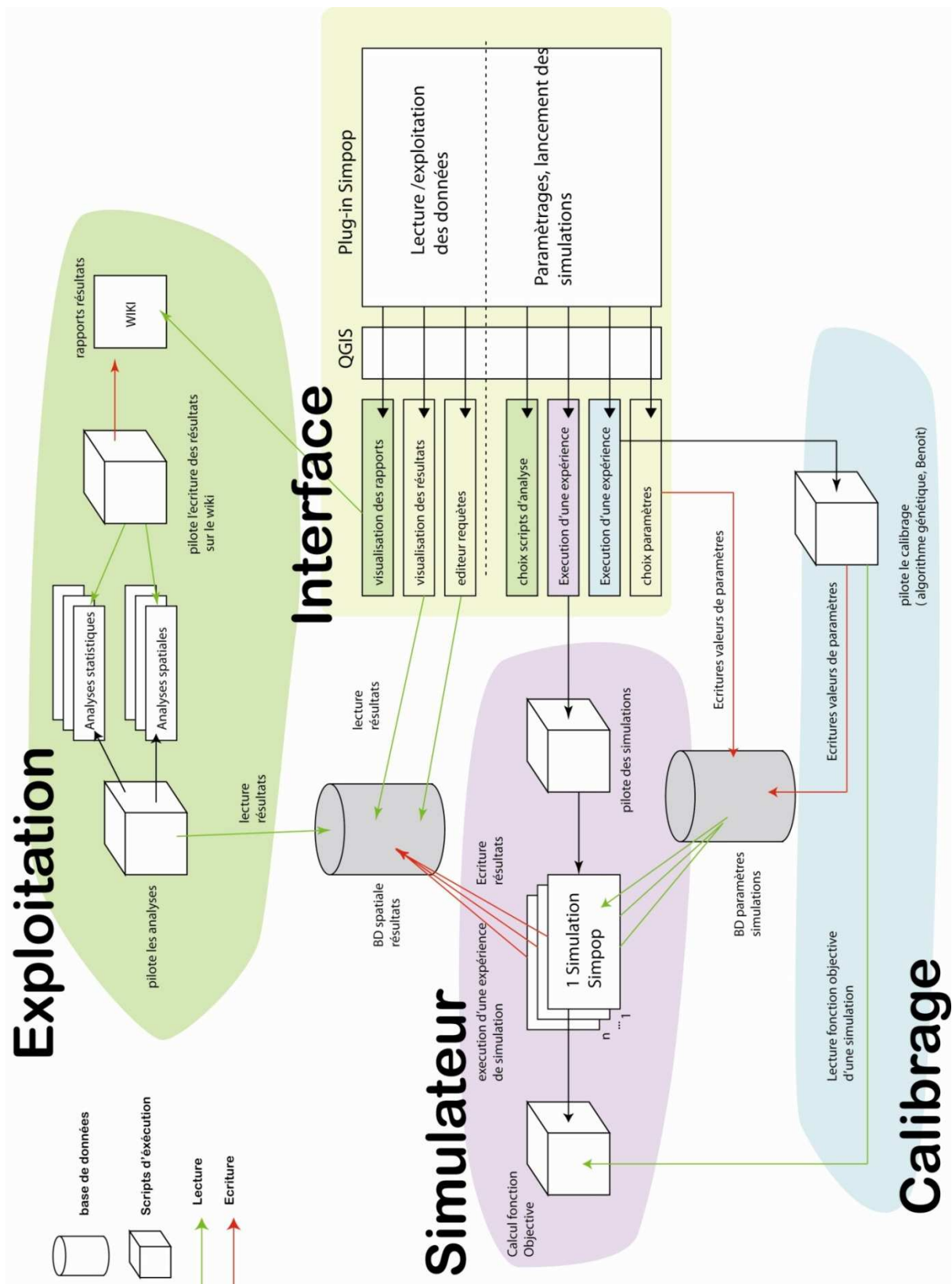


FIG. 4.22 – Les composants d'un nouvel environnement de simulation pour les applications du modèle Simpop2 et d'autres modèles de simulation (issu de [Rey09]).

Chapitre 5

Simuler les morphogenèses des villes

1	Des questions de modélisation	149
1.1	Contexte imposé par le système des villes	149
1.2	Processus de localisation des acteurs	151
1.3	Ville en évolution spatio-temporelle	152
1.4	Motifs de répartition dans la ville	154
1.5	Trajectoires simulées et confrontation aux hypothèses	155
2	simpopNano, un modèle long-terme de ville en développement . . .	157
2.1	Principe général	157
2.2	Entités : des objets quartiers et des agents fonctions	158
2.3	Règles d'évolution	159
2.4	Paramètres	160
3	Réalisation	160
3.1	Implémentation orientée objets	160
3.2	Des règles paramétrables vues comme des sous-modèles	161
4	Instanciation des règles	163
4.1	Accessibilité	163
4.2	Prix	164
4.3	Attractivité	165
4.4	Connaissance	166
4.5	Concurrence	166
4.6	Localisation	166
5	Démarche et outils pour l'expérimentation	169
5.1	Démarche d'expérimentation	170
5.2	Automatisation du workflow	170
5.3	Rapports d'expériences	171
5.4	Rapports de simulations	171
6	Expérimentations	171
6.1	Cohérence des mécanismes implementés	171
6.2	Expérience 1 : avec les fonctions non-résidentielles uniquement	173
6.3	Expérience 2 : avec les fonctions résidentielles uniquement	182
6.4	Poursuite de l'expérimentation et de l'évaluation	184
7	Conclusions du chapitre	185

Dans ce chapitre nous nous concentrons sur les hypothèses formulées dans le chapitre 3 au sujet de *la morphogénèse des villes* et que nous souhaitons mettre à l'épreuve de la simulation. Nous rappelons qu'à ce niveau d'organisation du peuplement, la principale implication hypothétique que nous souhaitons tester est :

$$\begin{aligned}
& \langle \text{Hyp, Villes, ContrainteSys.} \rangle \\
& \quad \& \langle \text{Hyp, Villes, LocGen} \rangle \\
& \quad \& \langle \text{Obs, Villes, Réseaux} \rangle \\
& \quad \& \langle \text{Obs, Villes, Vitesses} \rangle \\
& \implies \langle \text{Obs, Villes, Densités} \rangle \quad \& \quad \langle \text{Obs, Villes, Prix} \rangle \quad \& \quad \langle \text{Obs, Villes, Activités} \rangle
\end{aligned}
\tag{5.1}$$

Dans la section 1, nous nous intéressons à cinq questions de méthodologie posées par la traduction des termes de cette implication en des énoncés calculables. Ces questions concernent donc :

1. **<Hyp, Villes, ContrainteSys.>** : quelle est la résolution temporelle, et quels sont les acteurs et les processus pertinents pour tenir compte du contexte imposé par le système des villes à la ville en développement ?
2. **<Hyp, Villes, LocGen>** : comment représenter les processus de choix de localisation des acteurs ?
3. **<Obs, Villes, Réseaux — Vitesses>** : quelle représentation informatique donner à une ville en évolution dans l'espace et dans le temps ?
4. **<Obs, Villes, Densités — Prix — Activités>** : quelles mesures pour quantifier les motifs de répartition dans la ville ?
5. **\implies** : comment évaluer le développement simulé, et déterminer si le modèle vérifie ou non l'hypothèse testée ?

Pour chacune de ces questions nous proposons une solution que nous essayons d'ancrer dans la littérature sur la simulation urbaine. La section 2 décrit les principes de **simpopNano**, que nous avons conçu et implanté pour étudier ces implications intra-urbaines. La section 3 présente la décomposition de ce modèle en règles (ou sous-modèles), et l'approche implémentée pour laisser les géographes maîtres des règles effectivement utilisées dans l'exécution du modèle. Dans la section 4 nous détaillons les premières instances mises en place pour chacun des sous-modèles identifiés dans la section précédente. La démarche d'expérimentation et les outils qui ont été développés pour la soutenir sont l'objet de la section 5. Les expériences réalisées et la discussion de leurs résultats figurent dans la section 6.

La conclusion du chapitre fait le bilan d'avancement sur cette partie, en faisant le tri dans les questions ayant motivé notre collaboration, entre celles auxquelles le modèle a déjà permis de répondre, et celles qui restent en suspens et en attente d'expérimentations supplémentaires, de fouille dans les données générées, et de développements additionnels.

1 Des questions de modélisation

1.1 Quelle résolution temporelle, quels acteurs et quels processus sont pertinents pour tenir compte du contexte imposé par le système des villes à la ville en développement ? (<Hyp, Villes, ContrainteSys.>)

1.1.1 Résolution temporelle

Nous avons vu dans le second chapitre que l'histoire passée des villes donne un fort impact sur leurs possibilités d'évolutions futures. Nous devons considérer une période de temps qui permette de rendre compte des structurations progressives et différenciées de l'espace intra-urbain dans les villes des deux continents, en réponse aux évolutions des réseaux viaires des villes (<Obs, Villes, Réseaux>), et à l'évolution des vitesses de déplacement (<Obs, Villes, Vitesses>). Le modèle doit être dynamique. En raison de la jeunesse du système urbain états-unien, des données disponibles, et de la nécessité de considérer une période identique pour les deux types de villes, nous avons décidé de nous restreindre à une période de deux cents ans, allant de 1800 à 2000.

Dans cette longue durée de l'histoire des villes choisie pour la simulation, les événements qui comptent, en termes de réorganisation de la morphologie urbaine, et en dehors des grandes opérations d'urbanisme « contingentes » à telle ou telle ville, sont surtout les impulsions de croissance (et donc de construction) données par les principaux cycles de l'innovation technologique et économique. La durée de ces cycles étant de l'ordre de quelques décennies, des itérations couvrant chacune un intervalle de dix ans ont été retenues pour définir la résolution temporelle du modèle.

1.1.2 Acteurs et processus

Un modèle de ville « complet », simulant une croissance endogène sur la période [1800 – 2000] est hors d'atteinte, et incohérent avec ce que nous avons dit de la dépendance de la trajectoire d'une ville à sa position au sein du système des villes (<Hyp, Villes, ContraintesSys.>). Au vu des ambitions affichées, un modèle de *localisation d'acteurs urbains* paraît pertinent et suffisant, car c'est bien la façon dont l'espace se « remplit » et s'organise dans le temps qu'il nous faut essayer de capturer, pour reproduire les motifs de répartitions différenciées, traduites par les observations <Obs, Villes, Densités>, <Obs, Villes, Prix> et <Obs, Villes, Activités>. Mais quelles entités, quels acteurs considérer ?

Un modèle à l'échelle des individus, des ménages et des firmes semble inenvisageable : le nombre de niveaux géographiques intermédiaires à reconstruire serait trop grand. Pour contourner cette difficulté, nous avons choisi des acteurs plus agrégés : les *fonctions urbaines*.

Les fonctions urbaines comme acteurs intra-urbains. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la *fonction urbaine* est un concept défini à l'échelle inter-urbaine. Elle caractérise un rôle joué par la ville qui la possède au sein du système des villes dont elle fait partie. Un aspect original de notre approche est le transfert de ce concept au niveau intra-urbain, pour tester sa pertinence à décrire les dynamiques de localisation dans la ville sur le long terme.

Le choix de ces acteurs se justifie par l'échelle temporelle considérée, et les profonds changements structuraux qui sont intervenus. Durant les deux siècles simulés, nous sommes passés d'une ère pré-industrielle à une économie basée sur l'information. Pour résumer la variété et l'évolution des acteurs urbains pendant la période simulée, nous sommes repartis de la palette de fonctions urbaines utilisée par les géographes pour *Simpop2*, et présentée dans la section

2.2 du chapitre 4. Nous y reprenons neuf fonctions non résidentielles¹ : les quatre fonctions de type CENTRAL, les quatre de type CYCLE et une fonction de type politique/administratif ADMIN.

Nous leur ajoutons deux fonctions résidentielles, RICH (riches) et POOR (pauvres). Nous en avons choisi deux pour rester à un niveau de détail, pour la modélisation de type résidentiel, qui soit cohérent avec le niveau choisi pour la description des activités socio-économiques.

Comme pour Simpop2, chaque fonction urbaine est active pendant une période qui lui est propre, et toutes les fonctions ne sont présentes ni en même temps ni en mêmes proportions dans la ville. Par exemple, la fonction CYCLE4, qui représente les activités associées aux technologies de l'information, « entre » dans la ville à partir de 1960, et son effectif croît jusqu'en 2000. A l'opposé, la fonction CYCLE1, qui correspond à un cycle d'innovation plus ancien (commerce maritime), est présente dès le début de la période simulée (1800). Son importance décroît au profit des fonctions CYCLE suivantes, jusqu'à ce qu'elle disparaisse en 1850.

Guidage par les données historiques. A l'image des modèles *rasters* et d'automates cellulaires contraints que nous avons présentés dans le premier chapitre [DCW64, WE93], nous ne cherchons pas à rendre endogène la croissance de ces différentes fonctions urbaines, qui dépend de processus situés au niveau du système de villes [Pau04], [CPRSJ94]. Ceux-ci sont modélisés par Simpop2. Dans notre modèle de ville en développement, le nombre d'actifs à ventiler et le budget associé seront donc fixés pour chaque pas de temps et pour chaque fonction, il s'agira des *données d'entrée du modèle*. Nous avons dû définir des profils d'évolution temporelle des fonctions urbaines, en effectif et en budget, à partir des bases de données historiques élaborées au sein de *Géographie-Cités* [BGM08], de sources de données historiques [Bai85, Pin91], et de l'expertise des géographes. Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 3 (section 5.1), nous considérons les villes dont la taille de la population était comprise en 2000 entre un et trois millions d'habitants. En moyennant la population de ces villes tous les dix ans sur la période 1800-2000, nous obtenons un profil-moyen d'évolution de ville sur cette période. Le profil d'évolution de la population totale de la ville injecté en entrée ne correspond pas à l'évolution historique d'une ville particulière, mais à celle d'une ville virtuelle qui aurait pu exister. Nous plaquons sur ce profil un profil d'évolution de l'importance des fonctions, défini par les géographes et illustré par la figure 5.1.

Nous sommes donc dans le cadre des modèles historiques dont nous avons illustré une spécificité (cf. chapitre 3 section 5.2). Dans notre approche, comme dans les AC contraints [WE93, WEU97], la colonisation de l'espace est soumise à des contraintes de volume globales et exogènes qui empêchent sa représentation par une approche purement entité-centrée. Cependant notre approche se distingue de ces modèles sur plusieurs points :

1. dans ces mêmes AC, les catégories d'utilisation du sol manipulées sont souvent issues de nomenclatures d'activités détaillées qui font sens pour l'époque contemporaine, mais qui sont moins pertinentes que la fonction urbaine pour la période couverte par notre étude ;
2. ces catégories sont en général présentes toutes en même temps et pendant toute la période simulée, ce qui n'est pas notre cas avec les fonctions urbaines ;
3. notre maillage de l'espace n'a pas la même résolution (cf. section ??)

¹<http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/theGenericModel/otherEntities.php>

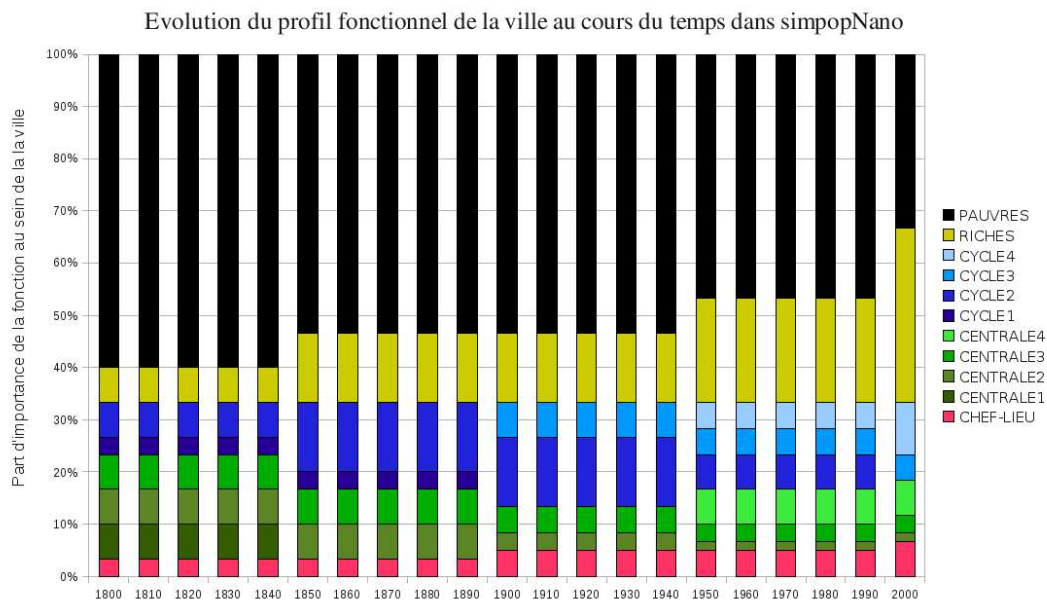


FIG. 5.1 – Exemple de profil d'évolution de la composition fonctionnelle de la ville au cours du temps dans simpopNano. Des profils d'évolution des taux d'importance des fonctions urbaines sont déterminés avec les géographes, et sont plaqués sur un profil-moyen d'évolution de population sur la période 1800-2000.

1.2 Comment représenter les processus de localisation des acteurs ? (<Hyp, Villes, Facteurs Localisation>)

La formalisation des logiques guidant les choix de localisation des acteurs urbains fait partie des études les plus répandues dans la littérature « agents » en analyse spatiale. Il s'agit d'une question centrale pour les modélisateurs de l'économie géographique et ceux de la géographie économique. D'après [Saned], ces deux courants se distinguent dans le rôle accordé à l'espace. Celui-ci est central dans le cas de la géographie économique, et les modélisateurs de ce courant ont multiplié les efforts pour qualitativement mieux intégrer son influence, quitte à développer des modèles complexes et à délaisser la résolution analytique ; de son côté, l'économie urbaine se focalise classiquement sur des modèles mathématiques à l'équilibre, centrés sur des agents rationnels maximisant une fonction d'utilité. Il est parfois difficile de capturer dans un ensemble d'équations continues et résolvable le jeu complexe observé entre les acteurs. La littérature économique à ce sujet est riche et abondante (voir par exemple l'ouvrage de [FKV01] ou l'article de [FT97] pour une synthèse). Nous essayons de faire quelque chose de différent, à la fois parce que les acteurs choisis sont des entités collectives, donc des acteurs « conceptuels » sur lesquels il est difficile de plaquer des modèles micro-économiques d'agents rationnels et optimisateurs, mais surtout parce que notre hypothèse n'est pas celle d'un équilibre stable ou instantané, mais celle d'une structure évolutive dans laquelle les fonctions peuvent se substituer les unes aux autres dans l'espace urbain, en fonction de l'importance, en effectif et en budget, qu'elles acquièrent de façon dynamique au niveau du système des villes. En bref, les hypothèses testées par nos modèles relèvent d'une théorie géographique évolutive et multi-niveaux des systèmes de villes [Pum97, PSB⁺09], et non pas d'une théorie d'économie urbaine, même si il est évident qu'au niveau intra-urbain il existe des points sur lesquels celles-ci s'intersectent.

Comportements banaux et atemporels. Nous avons vu dans la section ?? du chapitre 3 que l'on pouvait exprimer les hypothèses faites sur les comportements supposés dans les théories de la localisation, générateurs des formes de répartition dans la ville, à l'aide de quatre classes de mécanismes : attraction, répulsion, arbitrage et contrainte globale.

Le comportement de localisation des fonctions urbaines de **simpopNano** se fonde sur la notion d'attractivité différentielle des unités spatiales de la ville du point de vue des fonctions. Ces dernières attribuent des *scores* aux unités spatiales pour traduire cette attractivité. Chaque fonction maintient sa propre liste de lieux d'implantation potentiels, triés par ordre de désirabilité.

Notre hypothèse est que toutes les fonctions urbaines ont en commun de rechercher une *accessibilité maximale* (Attraction de l'accessibilité). Elles se différencient par le type de fonctions à côté desquelles elles cherchent à s'installer (Attraction synergique), ou au contraire dont elles cherchent à s'éloigner (Répulsion synergique). Les deux fonctions résidentielles (RICH & POOR) ajoutées se distinguent uniquement par leurs budgets, leurs « stratégies » de localisation étant identiques : riches comme pauvres cherchent à se localiser dans les quartiers les plus accessibles, mais leurs possibilités budgétaires pour le faire sont bien sûr différentes. Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, ces possibilités relèvent d'une contrainte exogène.

Comportements plus fins et historiques. Dans les villes, les besoins en espace varient selon les fonctions et selon les époques. Pour simplifier, nous considérons que l'espace nécessaire pour localiser un actif, toutes fonctions confondues, reste fixe au cours du temps et d'une fonction à l'autre.

De plus, sur la période de deux siècles que nous simulons, les quartiers des villes ont été amenés à se transformer afin de se requalifier. D'anciens quartiers manufacturiers et des friches industrielles ont été redéveloppés, des quartiers populaires gentrifiés, etc. Le modèle doit permettre de rendre compte de ces redéveloppements et de ces relocalisations d'activités. Nous traduisons ces phénomènes en postulant que les fonctions peuvent tout à la fois : cohabiter au sein d'un quartier ; se succéder dans un quartier ; quitter un quartier pour s'installer dans un autre, du fait de leur incapacité nouvelle à payer le loyer du quartier occupé ; enfin pour certaines, disparaître pendant la simulation (les CYCLES d'innovation obsolètes).

Enfin, autre simplification, nos règles de localisation n'intègrent pas les coûts supplémentaires engendrés par le déplacement (des personnes et des infrastructures) lors d'une relocalisation. Interpréter des motifs produits par le modèle comme figurant des phénomènes spatiaux plus qualitatifs (par exemple ceux mentionnés dans le chapitre 3²) n'est permise qu'à un niveau très « symbolique ». Nous ne devons pas perdre de vue le *risque de sur-interprétation* des résultats, l'un des six écueils identifiés par [Lee73].

En plus de ces changements fondamentaux des activités socio-économiques, l'emprise spatiale de la ville et les moyens de transports urbains ont également bien changé depuis 1800, avec l'apparition du ferroviaire, puis de l'automobile. Nous allons voir dans la section suivante comment représenter cette évolution.

1.3 Quelle représentation informatique de la ville en évolution spatio-temporelle ? (<Obs, Villes, Réseaux — Vitesses>)

Simuler une ville en développement dans l'espace et dans le temps impose de choisir une représentation de l'espace qui soit pertinente pour toute la période abordée par le modèle. La représentation très fine, la plus réaliste possible, des espaces géographiques dans les modèles [Cro10, BHS05, AM05, CPR10] est une possibilité de plus en plus exploitée, résultant des

²gentrification, friches industrielles (*brownfields*), gated communities, inner-cities, ...

avancées des SIG et des logiciels de cartographie 3D [CL00]. Ces outils permettent une représentation géométrique des objets géographiques aussi précise que souhaitée. En simulation, ils améliorent notamment la communication en offrant des visualisations réalistes qui facilitent l'appropriation du modèle par les experts et les décideurs, et favorisent un retour d'expertise. En revanche, il semble qu'à l'heure actuelle peu de modèles tirent parti de la finesse de représentations spatiales vectorielles pour inclure des mécanismes géométriques complexes modifiant la *structure de l'espace* modélisé.

De notre côté, deux raisons nous incitent à préférer une représentation de l'espace au moyen d'un graphe, plutôt que de travailler avec des données vectorielles précises issues de SIG :

1. Nous ne cherchons pas à simuler l'évolution dans le temps de la forme géométrique de la ville et de ses quartiers, mais celle de son organisation interne ;
2. L'échelle temporelle considérée rend arbitraire la définition de processus décrivant l'évolution de la forme physique de la ville.

Ainsi à l'instar des travaux présentés dans [Mat03], [BBM07] ou [O'S01], nous représentons l'espace intra-urbain par *un graphe cellulaire valué, non-orienté et dynamique*, plutôt qu'à l'aide d'une représentation surfacique plus fine. Les nœuds du graphe correspondent aux *quartiers* de la ville, les arêtes aux principaux axes du réseau de transports et leur poids au coût d'un déplacement sur cet axe. Nous faisons l'hypothèse forte que *les deux réseaux viaires ont une forme prédéterminée et qui reste fixe pour la période considérée*, car ils sont issus de la législation, du cadastre et de la culture pour les Etats-Unis, et de l'histoire millénaire de la ville pour l'Europe. Le « patron » du graphe est statique, c'est un paramètre du modèle. Il fixe une fois pour toutes la topologie du réseau viaire de la ville simulée et les formes géométriques potentielles de son expansion. Ces patrons, conçus par F. Delisle et A. Bretagnolle [Del08], sont représentés par la figure 5.2.

Nous avons décidé de découper la ville en *quartiers* dont la capacité d'accueil (un nombre d'emplacements) est limitée et fixée une fois pour toutes. Les quartiers peuvent avoir une capacité différente. Chaque emplacement au sein d'un quartier peut servir à localiser un actif et un seul. Chaque quartier correspond à une unité spatiale autonome. Ce choix résulte d'un compromis entre la nécessité de faire jouer la géométrie locale, tout en ayant un niveau de zoom suffisant pour que les interactions entre fonctions au niveau local, postulées dans les comportements de localisations, fassent sens, et que les fonctions urbaines trouvent à s'exprimer. Etant donnée la taille des villes considérées (entre un et trois millions en 2000), le nombre de quartiers choisi doit permettre la ventilation des fonctions en plusieurs lieux distincts, et générer un espace différencié en termes de remplissage (densité), de valeur (prix) et de spécialisations (fonctions).

L'activation des nœuds du graphe est dynamique, et les poids associés aux arêtes sont eux aussi dynamiques. A chaque nœud-quartier est associé une valeur *d'accessibilité* dynamique, réévaluée à chaque pas de simulation. Comme nous le verrons dans la section 4, plusieurs règles concurrentes de calcul de cette accessibilité ont été créées. L'enjeu de la construction d'un tel indicateur est de synthétiser en une valeur scalaire les influences cumulées de la topologie et des vitesses de transports.

Bien que l'on sache que dans certaines villes, le poids des infrastructures de transports est tel qu'elles sont elles aussi en concurrence avec les fonctions urbaines pour occuper l'espace, nous ne prenons pas en compte l'évolution des surfaces allant de pair avec l'évolution de ces infrastructures.

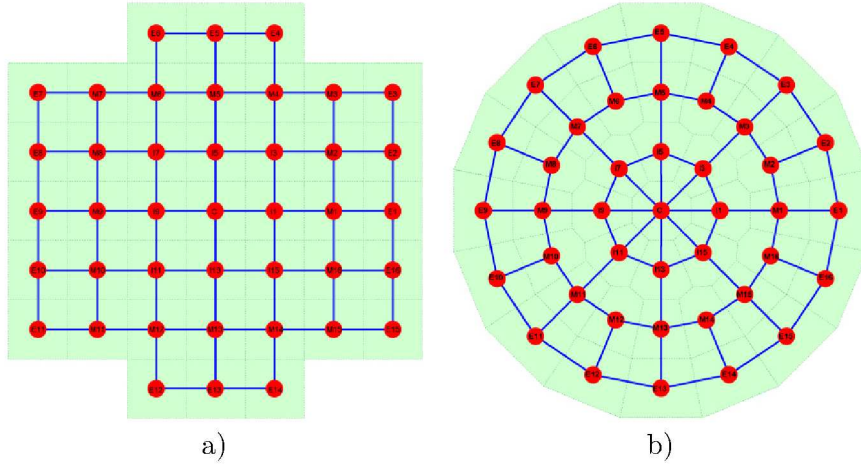


FIG. 5.2 – Graphes théoriques des réseaux viaires de a) la ville états-unienne et de b) la ville européenne [Del08]. Chacun d’entre eux contient 41 quartiers (noeuds)

1.4 Quelles mesures pour quantifier les motifs de répartition dans la ville ? (**<Obs, Villes, Densités — Prix — Activités>**)

1.4.1 Des indicateurs agrégés pour résumer les motifs spatiaux générés

Avec ce modèle de localisation spatiale générique et exécutable sur des géométries de villes différentes, nous voulons vérifier si des différences de géométrie suffisent, à elles seules, à expliquer des différences dans les répartitions spatiales des densités, des prix et des activités. Pour cela nous avons besoin, comme nous l’avons fait pour les géométries, de donner un contenu quantitatif précis aux différences de répartitions observées que nous avons isolées, **<Obs,Villes,Densités>**, **<Obs,Villes,Prix>** et **<Obs,Villes,Activités>**.

Dans la mesure où la texture spatiale de nos villes virtuelles est peu détaillée (41 unités spatiales dans les deux graphes de référence et 5 distances différentes de tous les quartiers au quartier central), calculer une valeur de gradient n’aurait pas beaucoup de sens. Nous pensons qu’il suffit, à ce niveau d’agrégation spatiale, de mesurer des indicateurs en moyenne et leurs variations dans l’espace. Les indicateurs que nous utilisons pour mesurer la répartition spatiale sont les *coefficients de variation spatiale*³ des densités ($CV_{Densité}$), des prix (CV_{Prix}), et des implantations des fonctions urbaines centrales et cycles ($CV_{CENTRAL}$ et CV_{CYCLE}). La valeur d’un coefficient de variation spatiale traduit la plus ou moins grande homogénéité de la répartition d’un caractère dans l’espace. Plus sa valeur tend vers 0, plus le phénomène est réparti de manière homogène dans l’espace. Plus sa valeur s’éloigne de 0, plus au contraire la répartition est hétérogène ou inégalitaire.

1.4.2 Comparaisons simulé-simulé et simulé-observé

Nous ne disposons pas des valeurs de ces indicateurs statistiques pour les villes de notre échantillon de référence. Il est donc difficile de calculer des écarts significatifs entre valeurs observées et simulées. Toutefois notre modélisation poursuit avant tout comme objectif de trouver un ensemble minimal de facteurs spatiaux qui produit des différenciations dans les répartitions spatiales simulées qui, dans une forme stylisée, soient à l’image de celles observées entre villes américaines et villes européennes. Cela a donc du sens d’évaluer notre modèle en cherchant, non

³le coefficient de variation d’une série de valeurs est égal à son écart-type divisé par sa moyenne.

pas à rapprocher les sorties simulées des données observées comme c'est le cas habituellement en simulation, mais à chercher les paramétrages des mécanismes implémentés qui génèrent des écarts entre sorties simulées, suivant la géométrie de référence sur laquelle le modèle est exécuté, comparables aux écarts observés.

Nous nous intéressons donc à *la comparaison des trajectoires simulées selon la géométrie utilisée, toutes choses égales par ailleurs*. Cela ne signifie pas que nous ne cherchons pas des mécanismes qui permettent de simuler des motifs proches, dans leurs mesures, des motifs observés. Mais encore une fois à l'heure actuelle nous ne disposons pas de valeurs significatives de ces indicateurs agrégés. En revanche, les géographes disposent d'heuristiques sur les valeurs des écarts, en moyenne, entre les valeurs de ces indicateurs dans l'un et l'autre de ces continents. Dans un premier temps, l'évaluation de la vraisemblance se fait donc uniquement en vérifiant que la densité moyenne simulée et ses variations dans l'espace restent dans des ordres de grandeur compatibles avec les valeurs moyennes des villes américaines ou européennes.

Dans cette optique d'évaluation d'un paramétrage par comparaison de configurations spatiales simulées, nous assimilons les observations $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Densités} \rangle$, $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Prix} \rangle$ et $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Activités} \rangle$ aux assertions suivantes :

1. $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Densités} \rangle \Leftrightarrow$ « Le coefficient de variation spatiale de la densité est plus grand dans les villes européennes que dans les villes états-uniennes. »
2. $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Prix} \rangle \Leftrightarrow$ « Le coefficient de variation spatiale du prix du sol est plus grand dans les villes européennes que dans les villes états-uniennes. »
3. $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Activités} \rangle \Leftrightarrow$ « Le coefficient de variation spatiale des fonctions urbaines est plus grand dans les villes états-uniennes que dans les villes européennes. »

Il s'agit d'une première approximation quantitative des trois observations. Les deux premières assertions traduisent bien l'idée que l'espace est plus inégalitaire en terme de densité et de prix dans les villes européennes que dans les villes américaines. La dernière assertion est une façon de traduire à la fois le plus grand zonage de l'espace urbain américain pour ce qui est des activités, mais aussi la plus forte ségrégation résidentielle. En revanche ces assertions ne nous disent rien sur la structure centre-périphérie de la répartition des densités et prix.

1.5 Comment comparer les trajectoires simulées et déterminer si le modèle vérifie ou non l'hypothèse testée ? (\Rightarrow)

Selon cette première approximation, pour que l'on puisse considérer que le modèle réussit à reproduire les différences de répartition observées, un même paramétrage devrait générer, lorsqu'il est exécuté sur la géométrie européenne, à la fois des valeurs de coefficients de variation plus élevées pour ce qui est des densités et des prix, et plus faibles pour ce qui est des fonctions urbaines, et ce à chaque date simulée, que lorsqu'il est exécuté sur la géométrie états-unienne. Notre modèle est dynamique et nous pouvons, à chaque pas de temps, comparer les configurations produites par un même paramétrage pour chacune des deux géométries (en supposant que chaque paramétrage soit exécuté consécutivement sur les deux géométries). A chaque pas de temps simulé, nous pouvons *compter* le nombre de relations d'ordres (sur les valeurs des coefficients de variation) qui sont effectivement vérifiées entre exécution sur géométrie européenne et exécution sur géométrie états-unienne. Nous proposons deux premières approches pour comparer les trajectoires de ville générées par les paramétrages :

1. La première est qualitative : nous privilégions les paramétrages qui maximisent le nombre de dates où la relation d'ordre entre les coefficients de variation spatiale d'une même variable est respectée entre les deux géométries. Pour chaque date on obtient un nombre

entre 0 et 3 (0 si l'ordre est mauvais pour chacun des trois coefficients de variations, 3 si il est bon dans les trois cas)

2. La seconde est quantitative : nous privilégions les paramétrages qui ont pour effet de maximiser la somme des écarts entre les valeurs prises par ces coefficients pour les deux géométries (l'opposé de la valeur absolue de l'écart est ajouté lorsque la relation d'ordre n'est pas respectée).

Ces deux approches sont illustrées par la figure 5.3.

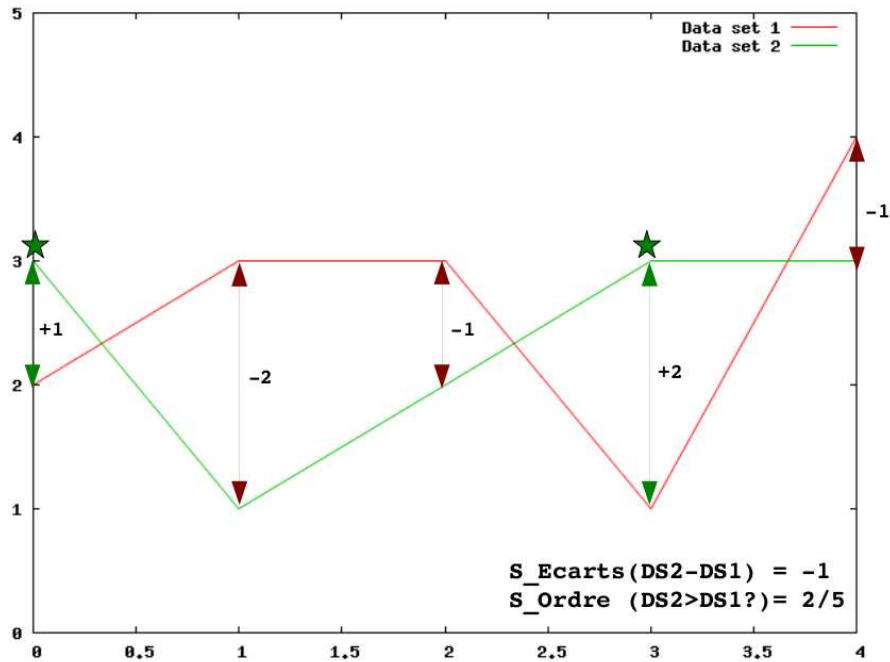


FIG. 5.3 – Illustration des deux scores mis en place pour évaluer la qualité d'un développement simulé. On suppose qu'on a un modèle de simulation paramétrable, et que sa sortie observable consiste en deux séries temporelles de données, DS1 (en rouge) et DS2 (en vert). On suppose par ailleurs que pour que le phénomène soit bien reproduit, DS2 doit être supérieur à DS1. Une première façon d'évaluer la qualité de la reproduction du phénomène est de compter le nombre de dates échantillonnées pour lesquelles la relation d'ordre entre DS2 et DS1 est respectée (la courbe verte est au-dessus de la rouge, ces dates sont marquées par des étoiles sur la figure). Avec cette évaluation, le paramétrage obtient un score de 2/5. Une deuxième façon d'évaluer consiste à sommer, sur l'ensemble des dates échantillonnées, les écarts entre les deux courbes (ici symbolisés par des flèches étiquetées par la valeur de l'écart, négatif quand la relation d'ordre est mauvaise). Avec ce mode d'évaluation, le paramétrage obtiendrait un score de -1. Ces deux scores permettent d'ordonner systématiquement les paramétrages.

Chacun des deux scores peut être mesuré à chaque instant du développement, et chacun est représenté par un vecteur de 21 valeurs⁴. En sommant les valeurs obtenues par un même score sur l'ensemble des 21 dates simulées, chaque paramétrage se voit ainsi attribuer deux scores (un qualitatif et un quantitatif) qui évaluent en première approximation sa capacité à générer $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Densités} \rangle$, $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Prix} \rangle$ et $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Activités} \rangle$. Nous disposons alors d'indicateurs quantitatifs pour comparer les développements simulés et classer les paramétrages.

⁴pour les 21 ($= \frac{2000-1790}{10}$) pas de temps simulés d'une exécution

La question qui vient immédiatement ensuite est : « A partir de quelles valeurs de ces scores peut-on considérer que le paramétrage du modèle vérifie, dans une traduction computationnelle, l'implication principale testée (cf. eq. 5.1) ? ». Assurément, un score maximal sur le score qualitatif (*i.e* pour toutes les dates simulées, les relations d'ordre entre coefficients de variation sont vérifiées) signifierait sûrement que le phénomène simulé est qualitativement conforme aux observations géographiques énoncées. Mais si les écarts associés sont beaucoup plus grands qu'en moyenne dans l'observé, le paramétrage peut-il être validé ? Y-a-t-il des plages de valeurs de ces scores qui fassent consensus chez les géographes ? Apporter des réponses à ces questions est une étape indispensable à la définition d'une grille d'évaluation géographique plus riche qui puisse être automatisée. Nous les laissons ouvertes pour le moment. Nous reviendrons dessus dans la présentation des premières expériences (*cf.* section 6).

2 **simpopNano** : un modèle de localisation de fonctions urbaines dans la ville sur le long-terme

2.1 Principe général

Le principe général de notre modèle est le suivant : à chaque pas de temps simulé, les fonctions urbaines possèdent toutes un effectif d'actifs qu'elles doivent localiser dans la ville, ainsi qu'un budget pour ce faire. La ville est constituée d'un nombre fini de quartiers qui s'inscrivent dans un réseau, représenté par un graphe. La topologie de ce graphe est immuable pendant le temps de simulation, et est donnée *a priori*. Les quartiers sont les nœuds du graphe. Ils sont décrits par des attributs (accessibilité, potentiel économique, loyer) dont les valeurs changent pendant la simulation. L'accessibilité et le potentiel économique des quartiers les rendent plus ou moins *attractifs* aux yeux des différentes fonctions.

Les fonctions se distinguent les unes des autres par leurs effectifs et leurs budgets, mais également par leurs préférences à l'égard des autres fonctions. Chaque fonction urbaine calcule à chaque pas de temps, et pour chaque quartier, le score qu'elle lui attribue. Sur la base de ces scores, chacune trie la liste de ses quartiers préférés, qui traduit l'ordre des quartiers dans lesquels elle va tenter de localiser son effectif.

La *capacité* d'un quartier intervient dans le modèle pour limiter la possibilité de s'y installer une fois qu'il est saturé. Cependant, le fait qu'un quartier soit « plein » n'empêche pas les fonctions de le trouver attractif, donc de le classer « haut » dans leur liste de quartiers préférentiels, et de lui émettre des requêtes de localisation. Celles-ci restent insatisfaites tant que le quartier est saturé, mais cette désirabilité du quartier peut faire gonfler son loyer. Dynamiquement, l'augmentation du loyer d'un quartier peut le rendre inabordable aux fonctions possédant les budgets les plus faibles qui y sont installées et qui ne sont alors plus en mesure de payer les localisations de leurs actifs. Le cas échéant, celles-ci doivent alors se relocaliser dans des quartiers moins chers, laissant la place libre aux fonctions les plus riches.

Ce cadre est volontairement très général, car notre objectif est de disposer d'une plate-forme qui permette de tester différentes hypothèses sur la forme prise par chacun des processus de ce modèle intra-urbain sur le long-terme (*cf.* section 4). Ce n'est que dans un second temps que les tests et l'exploration permettront de sélectionner les règles d'évolution les plus adaptées pour rendre compte des différences d'organisation spatiale et à fixer certaines parties du modèle pour l'instant paramétrables.

2.2 Entités : des objets quartiers et des agents fonctions

2.2.1 La ville est un réseau de quartiers...

On considère N quartiers. Un quartier q_j est un objet décrit par plusieurs observables. A_j^t est la valeur de l'accessibilité de q_j à la date t . C_j^t représente la capacité d'accueil de q_j à la date t , il correspond au nombre d'actifs que le quartier peut encore accueillir avant d'être complet. On suppose donc que les quartiers ont une capacité d'accueil limitée, qui est la même à t_0 pour tous les quartiers du modèle et qu'on note donc C^0 . P_j^t est le prix à payer pour un emplacement dans le quartier q_j à la date t , il correspond à ce que doit payer une fonction i pour chacun de ses employés localisés dans q_j à t ($P_j^t \in \mathbb{R}^+$). $locDemands_{i,j}^t$ désigne le nombre de requêtes de localisation exprimées par la fonction f_i au quartier q_j à la date t . Cette valeur est utilisée pour calculer la valeur de τ_j^t , le taux de variation de la désirabilité de q_j . Celui-ci est défini par la formule :

$$\tau_j^t = \frac{\sum_{i=0}^M locDemands_{i,j}^t}{\sum_{i=0}^M locDemands_{i,j}^{t-1}} \quad (5.2)$$

L'équation (5.2) définit le taux de variation de la désirabilité de q_j à une date donnée comme le quotient du nombre de requêtes reçus par q_j de la part de l'ensemble des M fonctions urbaines à cette date, sur le nombre de ces requêtes à la date précédente.

2.2.2 ... colonisé par des fonctions urbaines

On considère M fonctions urbaines. La fonction f_i est décrite par plusieurs observables. L_i^t représente le nombre d'actifs de f_i à localiser à t (c'est-à-dire qui ne sont pas encore localisés dans un des N quartiers). E_{ij}^t représente le nombre d'actifs de f_i localisés dans q_j et $E_i^t = \sum_{j=0}^N E_{ij}^t + L_i^t$ représente le nombre total d'employés de f_i à l'instant t . W_i^t est le budget de f_i et $pref_i = (pref_{i,0} \dots pref_{i,k} \dots pref_{i,M})$ est le vecteur des valeurs synthétisant les synergies de f_i avec les M fonctions urbaines. $pref_{i,k}$ ($\in [0..1]$) symbolise l'intensité de l'attraction ou de la répulsion de f_i pour f_k , la valeur 0.5 représentant la neutralité de f_i envers f_k . C'est la valeur par défaut.

La valeur de $EP_{i,j}^t$ exprime l'attrait qu'exerce q_j pour f_i à la date t grâce aux fonctions qui y sont déjà localisées. Ce potentiel est défini par :

$$EP_{i,j}^t = \sum_{k=0}^M pref_{i,k} \times \sum_{l=0}^N \frac{E_{k,l}^t}{1 + c_{j,l}} \quad (5.3)$$

L'équation (5.3) indique que la valeur de $EP_{i,j}^t$ dépend de la configuration fonctionnelle existante dans le quartier q_j considéré, mais également dans tout autre quartier q_l , en proportion inverse du coût $c_{j,l}$ du chemin qui relie q_j à q_l dans le graphe. Il s'en suit qu'un même quartier n'a pas le même potentiel économique suivant la fonction urbaine considérée.

$S_i^t = (S_{i,1}^t \dots S_{i,j}^t \dots S_{i,N}^t)$ est le vecteur des N scores attribués par f_i aux N quartiers du modèle à la date t . $prefLocalisations_i^t = (q_{i_1} \dots q_{i_N})$ est la liste des quartiers triée par ordre d'attractivité au sens de f_i . La liste peut-être triée strictement, avec comme critère de tri $S_{i,i_1} \geq \dots S_{i,i_k} \geq \dots \geq S_{i,i_N}$.

Le score $S_{i,j}^t$ attribué par la fonction f_i au quartier q_j à la date t est l'image d'une fonction d'attractivité $s_{\alpha,\beta} : (A_j^t, EP_{i,j}^t) \rightarrow S_{i,j}^t$ dont plusieurs formes peuvent être envisagées. α et β sont des paramètres contrôlant la combinaison de l'accessibilité et du potentiel économique. Nous en présenterons quatre dans la section 4, que nous testerons dans la section 6.

2.3 Règles d'évolution

Les variables d'état des quartiers et des fonctions évoluent suivant des règles que nous présentons ci-dessous. *L'ordre dans lequel nous présentons ces règles correspond à leur ordre d'occurrence pendant une itération du modèle.* Nous les avons séparées en deux catégories :

- les règles *exogènes*, qui correspondent à des mises à jour de valeurs de paramètres. Ce sont des *commandes* envoyées au système depuis l'extérieur de celui-ci ;
- les règles *endogènes*, qui correspondent à des mécanismes internes au modèle, et qui aboutissent à des modifications des valeurs des variables du fait des *calculs* effectués par le modèle.

Un second découpage a été fait entre :

- les règles paramétrables, dont le nom figure **en gras**. Ce sont celles pour lesquelles plusieurs instances ont été proposées. L'expérimentateur peut choisir au lancement de la simulation quelle instance il souhaite voir appliquer pour cette règle ;
- Les règles dont le nom est *en italique* sont les règles non paramétrables.

2.3.1 Règles exogènes

R_{Contexte} : Met à jour les effectifs et budgets des fonctions à partir des données d'entrée.

$$\forall i \in \{1, \dots, \mathbf{M}\}, E_i^t = E_i^t + \Delta \mathbf{E}_i^t \text{ et } L_i^t = L_i^t + \Delta \mathbf{E}_i^t$$

$$\forall i \in \{1, \dots, \mathbf{M}\}, W_i^t = W_i^t + \Delta \mathbf{W}_i^t$$

2.3.2 Règles endogènes

R_{Accessibilité} : *Met à jour / Calcule l'indice d'accessibilité des quartiers du réseau urbain.*

$$\forall j \in \{1, \dots, \mathbf{N}\}, \text{ calculer } \mathbf{A}_j^t \text{ (cf. section 4.1)}$$

R_{EP} : Calcule la matrice des potentiels économiques EP.

$$\forall i \in \{1 \dots \mathbf{M}\}, \forall j \in \{1 \dots \mathbf{N}\}, \text{ calculer } EP_{i,j}^t \text{ (cf. équation (5.3))}$$

R_{Prix} : *Calcule le loyer des quartiers.*

$$\forall j \in \{1, \dots, \mathbf{N}\}, \text{ calculer } \tau_j^t \text{ (cf. équation (5.2)), et } P_j^t \text{ (cf. section 4.2)}$$

R_{Attractivité} : *Calcule les scores attribués par les fonctions aux quartiers.*

$$\forall i \in \{1, \dots, \mathbf{M}\}, \text{ calculer } S_i^t \text{ (cf. section 4.3)}$$

R_{Connaissance} : *Trie la liste des quartiers préférés de chaque fonction.*

$$\text{Trie } \text{prefLocalisations}_i^t \text{ (cf. section 4.4)}$$

R_{Paiement} : *Paie les emplacements occupés par les fonctions pour leurs employés déjà localisés. L'ordre de paiement des loyers est celui de considération des quartiers, déterminé par R_{Connaissance}.*

R_{Concurrence} : *Détermine l'ordre de priorité entre fonctions urbaines en cas de conflits de localisation (cf. section 4.5)*

R_{Localisation} : *Répartit les employés qui ne sont pas localisés. (cf. 4.6)*

2.4 Paramètres

Certaines valeurs manipulées dans le modèle sont fixées par l'utilisateur avant la simulation. Ce sont les paramètres du modèle.

2.4.1 Paramètres liés à l'espace et au réseau de transports urbains

C_0 représente la capacité initiale des quartiers. C'est le nombre d'actifs que peut contenir au maximum un quartier à tout instant de la simulation. Nous faisons l'hypothèse forte que *la capacité maximale d'accueil est fixée a priori, n'évolue pas au cours du temps, et est identique pour tous les quartiers*. Nous nous distinguons du modèle logistique de remplissage souvent employé (par Wilson et Allen notamment), avec une capacité maximale de remplissage qui est fonction de la taille de la population (avec l'idée sous-jacente que plus grande est la taille de la population, plus importante est la capacité d'innovation, et donc plus la limite peut être repoussée).

$c_{i,l}$ est le coût du plus court chemin reliant les quartiers q_i et q_l dans le graphe. Ce coût est calculé à l'initialisation du modèle. Il existe une instance de la règle d'accessibilité telle que l'indice d'accessibilité A_j^t de j à t n'est pas calculé mais prédéfini, et corresponde à un indice de Shimbel tenant compte de l'évolution historique des vitesses (cf. section 4.1).

2.4.2 Autres paramètres

M est le nombre de fonctions urbaines (11 actuellement) et N le nombre de quartiers (41 dans les graphes présentés). $\Delta E_{i,i \in 1 \dots M}^{t,t \in 0 \dots T}$ est le nombre de nouveaux actifs de f_i à t , et $\Delta W_{i,i \in 1 \dots M}^{t,t \in 0 \dots T}$ l'incrément de son budget. Contrairement aux profils d'évolution des populations, ces profils de budgets ne se fondent sur aucune mesure réelle, ce sont des valeurs symboliques. L'ordre de grandeur des ratio entre budgets de fonctions urbaines différentes traduit une expertise, mais les valeurs absolues de cette variable ne sont en rien significatives.

Enfin $\text{pref}_i = (\text{pref}_{i,0} \dots \text{pref}_{i,k} \dots \text{pref}_{i,M})$ est le vecteur des facteurs d'attraction/répulsion de la fonction i envers les M fonctions du modèle (y compris elle-même). Il traduit les synergies entre f_i et les autres fonctions, et entre f_i et elle-même.

3 Réalisation

3.1 Implémentation orientée objets

La faible sophistication des comportements des entités du modèle de conception (cf. section 2), l'absence d'interactions directes entre entités⁵, la *structure statique* de l'état de la ville (cf. section 1.3), nous font penser que l'implémentation ne tirerait pas avantage d'une implémentation à base d'agents par rapport à une implémentation à base d'objets. L'implémentation actuelle de **simpopNano** est donc orientée objets, et « directe » : chaque entité du modèle est représentée par une classe. Les classes du programme sont brièvement décrites dans la sous-section suivante.

3.1.1 Organisation du code

Le modèle a été implémenté dans un logiciel écrit en *Objective-C* et qui s'appuie sur *Swarm* [MBLA96]. Celui-ci propose un canevas pour logiquement séparer le modèle, qui contient les objets et processus géographiques, de ses « observateurs », qui sont responsables de l'exploitation du modèle.

⁵les fonctions s'influencent mutuellement par l'intermédiaire de leurs localisations dans l'espace, mais leurs interactions sont indirectes et médiées par l'environnement.

Les objets du domaine simulé sont représentés par des instances d'une des deux classes, *Fonction* et *Quartier*. Le contrôle est géré par un objet *ModelSwarm*, qui est responsable de l'ordonnancement. Pour ne pas introduire d'artefact lié au séquençement, les fonctions et les quartiers sont aléatoirement mélangés avant chaque exécution de mécanisme concernant l'ensemble des agents / objets.

Un objet *ObserverSwarm*, qui est un conteneur du modèle (*ModelSwarm*) contient comme son nom l'indique les outils pour l'« observer » : il assure la production de graphes et de cartes en temps-réel des données calculées par le modèle. Il est également responsable de l'enregistrement dynamique de cartes de répartition qui sont ensuite intégrées aux rapports de simulation et visualisées en différé (cf. section 5).

Deux classes *Input* et *Output* regroupent les méthodes responsables respectivement de l'initialisation des objets du modèle avec les données contenues dans les fichiers de budgets et de population fournis en entrée, et de l'écriture des données produites par le modèle dans les fichiers de sortie.

Enfin, un objet *Parameters*, tient un rôle complémentaire de celui de *Output* et *Input*. Il se charge de définir les paramètres du modèle et de récupérer leur valeurs en fonction des options passés par l'utilisateur lors du lancement du modèle, sur la ligne de commande (en mode batch) ou dans des composants graphiques (en mode IHM). Le choix du mode d'exécution (batch ou IHM) est d'ailleurs en lui-même un paramètre.

3.1.2 Choix techniques et performance

Contrairement à *Simpop2*, cette implémentation s'appuie sur un typage fort et statique, ainsi que sur des algorithmes pour lesquels nous avons privilégié la clarté à l'optimisation de la performance. Ces choix favorisent la lisibilité, la maintenance et l'extensibilité du code. Ils nous semblent cohérents avec la puissance de calcul des architectures actuelles, matérielles comme logicielles, et l'accès facilité aux grilles si le besoin s'en fait sentir.

De plus, les instances de règles actuellement utilisées sont peu gourmandes en calculs, et sur un PC standard en 2010⁶, l'exécution de l'ensemble des 2600 simulations de l'Expérience « Non-résidentielles uniquement » (cf. section ??) ne nécessite qu'un peu plus de deux heures de temps de calcul. Ces temps de calcul nous permettent d'envisager d'importants raffinements dans les instances de règles qui seront développées ultérieurement.

Nous avons pointé les difficultés de la reprise de *Simpop2* en raison des lacunes de sa documentation. En contrepoint un effort important a donc été fait pour commenter et *tagger* le code de *simpopNano* de façon normée et compatible avec les outils répandus de génération de documentation hypertexte (Javadoc, Doxygen).

Dans sa version actuelle le logiciel fait 8500 lignes de code et il peut être exécuté sur toutes les plates-formes pour lesquelles *Swarm* est disponible (Windows, Linux et MacOS notamment)⁷.

3.2 Des règles paramétrables vues comme des sous-modèles

Nous avons vu qu'une itération de *simpopNano* consiste en l'exécution séquentielle de neuf règles. Nous pouvons voir six de ces règles comme des sous-modèles dissociables, et pour lesquels des formes différentes existent dans la littérature. Elles sont :

1. **Accessibilité.** La fonction d'évolution de l'accessibilité des quartiers.
2. **Prix.** La fonction d'évolution du prix des quartiers.

⁶2 processeurs Intel 2.13 GHz couplés à 2Go de mémoire vive, exploités par Linux 2.6

⁷Le code source est téléchargeable à <http://www.ibisc.fr/~tlouail/nano.html>

3. **Attractivité / Score.** La fonction de *score* des fonctions urbaines, qui détermine l'*attractivité* des quartiers. Suivant la fonction effectivement choisie, des paramètres supplémentaires peuvent être associés à ce module.
4. **Connaissance.** La fonction responsable de l'ordonnancement des quartiers sur la base des scores attribués. Elle détermine l'ordre de traitement des quartiers dans l'algorithme de localisation. Ce module détermine également l'ordre de considération des quartiers pour le paiement des places occupées par une fonction, et donc les localisations gardées en priorité lorsque la fonction urbaine n'est plus en mesure de payer l'intégralité de ses localisations.
5. **Concurrence.** L'algorithme qui détermine l'ordre de priorité entre les fonctions urbaines à chaque itération. Il peut être déterministe (par exemple les plus riches sont systématiquement prioritaires) ou stochastique. C'est à ce niveau qu'est déterminée la résolution en cas de conflit sur les localisations (plusieurs fonctions désirent s'implanter dans un même quartier, mais il n'y pas pas assez de place pour toutes).
6. **Localisation/Répartition.** L'algorithme de répartition des employés/actifs des fonctions parmi les quartiers. La localisation peut se faire en autorisant les localisations multiples d'un nouvel effectif d'arrivants, ou bien au contraire en imposant qu'à chaque date l'intégralité de cet effectif de nouveaux arrivants d'une fonction soit localisé dans un seul et même quartier.

En cela, nous nous inspirons de modèles comme *UrbanSim*⁸, de l'Université du Washington [WBN⁺03]. *Urbansim* est un modèle générique d'aide à la décision pour la planification urbaine à l'échelle d'une métropole. Son architecture modulaire (dissociation des aspects économiques, transports, logements, etc.) se prête bien à une conception indépendante de chacun des modules avec les experts de chaque domaine.

Pour chacun des sous-modèles, plusieurs instances concurrentes ont été développées (voir section 4 et tableau récapitulatif 1 page 168). Une option est associée à chacun de ces modules, et un identificateur entier à chacune des instances. L'instance choisie pour chacun des modules est ainsi positionnable dans la ligne de commandes lançant la simulation. Cela facilite le lancement d'expériences (simulations en lot). La ligne suivante donne un exemple :

```
./simpopNano --modelId=1 --wealthFile=./inputFiles/wealthFiles/riches
se_2Fonc_residentielles.dbf --popFile=./inputFiles/populationFiles/populations_2
Fonc_residentielles.dbf --qInitCapacity=50000 --accessModelId=1 --priceModelId=1
3 --attractivityModelId=1 --knowledgeModelId=1 --concurrencyModelId=1 --localisa
tionModelId=3
```

Elle a pour effet de lancer l'exécution de *simpopNano* avec :

- la géométrie européenne (modelId=1) ;
- une capacité C^0 de 50000 places par quartier ;
- la règle d'accessibilité 1 ;
- la règle de prix 13 ;
- la règle d'attractivité 1 ;
- la règle de connaissance 1 ;
- la règle de concurrence 1 ;
- la règle de localisation 3.

⁸<http://www.urbansim.org/Main/WebHome>

4 Instanciation des règles

Nous avons indiqué dans la section précédente que l'application réalisée est *neutre* par rapport aux règles effectivement choisies pour faire évoluer les variables d'état du modèle. Chaque règle doit être vue comme une boîte noire que les géographes sont libres d'instancier par des formules ou algorithmes de leur choix.

Dans cette section, nous proposons pour chacun de ces modules des premières instances heuristiques, plus fondées sur notre intuition que sur la littérature. Elles seront utilisées dans les expériences présentées ensuite. Ce sera par la suite aux géographes d'affiner ces instances et d'en ajouter d'autres.

Dans l'état actuel du code, le coût de développement supplémentaire associé à l'ajout d'une nouvelle instance de règle nous semble très faible, mais cet ajout nécessite tout de même la connaissance d'Objective-C, et l'application doit être recompilée. L'extension du modèle n'est pas gérable pour l'instant par les seuls fichiers de configuration.

4.1 Accessibilité

Nous avons expliqué dans la section 1.3 notre choix de traduire les observations $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Réseaux} \rangle$ et $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesses} \rangle$ au moyen d'un graphe :

- La topologie de ce graphe traduit $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Réseaux} \rangle$;
- La pondération des arrêtes traduit $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesses} \rangle$.

Nous souhaitons combiner ces deux informations dans un indicateur dynamique A_j^t associé à chaque noeud-quartier j du graphe urbain et traduisant son accessibilité à t .

Dans le cadre de la construction de ces graphes de réseaux viaires théoriques, un travail de définition de tels indicateurs dynamiques, tenant compte de l'évolution de la surface de la ville au cours du temps et de celle des vitesses a été réalisé par F.Delisle et A.Bretagnolle [Del08]. Parmi les indicateurs proposés, l'un d'entre eux a retenu notre attention, l'*indice de Shimbél temporalisé*. En se basant sur la somme des plus courts chemins sur un graphe valué dynamique, il articule topologie du réseau et vitesses évolutives de transports (représentées par des pondérations dynamiques des arêtes). Notre première instance de ce module consiste donc à mettre à jour à chaque pas de temps l'accessibilité A_j de chaque quartier j pour la faire correspondre à la valeur calculée par [Del08]. Cette instance $R_{\text{Accessibilité}}^1$ est *exogène*.

En parallèle, nous souhaitons disposer d'une règle *endogène* de calcul de cet indice de Shimbél. Endogénéiser la mesure de l'accessibilité évite de conférer *a priori* à l'espace urbain des propriétés d'accessibilité qui ne sont en fait réalisées qu'au moment où le sol est véritablement occupé par des activités. Cette amélioration est essentielle car par rapport à la première instance, elle permet de rendre compte d'une auto-organisation.

Dans ce calcul dynamique, nous ne considérons, dans le calcul de la somme des plus courts chemins d'un noeud q_j à tous les autres, que les noeuds-quartiers déjà colonisés. Pour les noeuds vides, nous additionnons à la somme une valeur très pénalisante. Ce choix traduit l'idée que la centralité doit être définie relativement pour déterminer l'accessibilité d'un quartier q_j , tenir compte du plus court chemin qui le relie à un quartier q_k n'a de sens que si q_k lui-même est un quartier colonisé.

Calculer de façon dynamique cet indice de Shimbél nous permet de plus d'avoir le choix entre tenir compte :

1. de la topologie uniquement ($\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Réseaux} \rangle$), en considérant des graphes non valués (équivalent à une valuation homogène) ;

2. de la topologie ($\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Réseaux} \rangle$) et d'une métrique de circulation différenciée selon les axes ($\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesses} \rangle$).

Pour réaliser ces deux possibilités, nous proposons deux instances endogènes, qui correspondent à deux couples de graphes :

1. une instance $R_{\text{Accessibilité}}^2$ où les deux graphes, européen et états-unien, ne sont pas valués ;
2. une instance $R_{\text{Accessibilité}}^3$ où les poids des arrêtes sont différentes dans le graphe européen, et identiques dans le graphe US, pour refléter la différenciation interne de la ville européenne et l'uniformité de la ville US en terme de vitesses ($\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesses} \rangle$).

A son tour, cette métrique pourrait également être dynamique. Nous ne considérerons ici que le cas simplifié où elle est statique. Avec l'indice de Shimbél, la valeur absolue du poids des arêtes est sans importance, et seule compte la différenciation de ces poids entre les arêtes. Garder les poids des arêtes constants pendant toute la durée de la simulation revient, dans ce cas, à faire l'hypothèse que le ratio entre vitesse au centre et vitesses en périphérie est resté constant entre 1800 et 2000.

4.2 Prix

Dans les modèles d'Allen[AS79] et de Wilson[Wil81] présentés dans le premier chapitre, les prix ne sont pas directement modélisés. Les différences de pouvoir d'achat des classes de résidents y sont représentées par des sensibilités différentes à la fois aux coûts des déplacements et à la densité des zones[PSJS89].

Une fonction candidate pour faire évoluer les loyers des quartiers doit respecter plusieurs contraintes :

1. Elle doit être cohérente avec les déterminants des prix identifiés dans la littérature ;
2. Elle doit être cohérente avec le niveau de richesse des occupants de la ville, donc avec les profils d'évolution de budgets des fonctions urbaines, donnés en entrée du modèle.

Nous décidons dans une première instance de faire du prix une fonction de la seule accessibilité. Le prix d'une *unité d'accessibilité* à chaque pas de temps est déterminé dynamiquement par la formule :

$$P_{\text{AccessUnit}}^t = \frac{\sum_{i=0}^M W_i^t}{\sum_{j=0}^N (A_j^t \times C_j^0)} \quad (5.4)$$

Elle indique que pour déterminer le prix courant d'une unité d'accessibilité, on divise la somme des budgets courants des fonctions de la ville par la somme, sur l'ensemble des quartiers, des produits de l'accessibilité d'un quartier par sa capacité d'accueil totale (qui est égale à sa capacité initiale C_j^0).

Ce prix d'une unité d'accessibilité permet donc de lier l'évolution des prix à celles des budgets des fonctions urbaines. Il ferme la porte à l'apparition de cas extrêmes et non désirés, tels que l'absence totale de localisation des fonctions, en raison de budgets inférieurs aux prix générés. Cela ne signifie pas qu'une instance fondée sur ce prix unitaire ne peut pas engendrer de phénomène de non-localisation. Ceux-ci peuvent apparaître pour les fonctions les moins bien loties en terme de budget, sous l'effet de la pression foncière exercée par les fonctions les plus riches pour le sol. L'impossibilité pour ces fonctions à petits budgets à se localiser traduit en quelque sorte la sortie des fonctions pauvres hors des villes.

En première approximation, nous proposons les instances de règle de prix suivantes, basées sur le prix d'une unité d'accessibilité :

1. R_{Prix}^1 : le prix P_j^t d'un quartier q_j augmente avec son accessibilité A_j^t et avec son taux de désirabilité τ_j^t .

$$P_j^t = A_j^t \cdot \tau_j^t$$

2. R_{Prix}^2 : le prix de q_j est proportionnel à son accessibilité A_j^t , normalisée par l'accessibilité maximale.

$$P_j^t = \frac{A_j^t}{\max_{k=1..N}(A_k^t)} \times P_{AccessUnit}^t$$

3. R_{Prix}^3 : le prix de q_j est proportionnel au quotient de son accessibilité A_j^t sur l'accessibilité moyenne dans la ville.

$$P_j^t = \frac{A_j^t}{\frac{\sum_{k=1}^N A_k^t}{N}} \times P_{AccessUnit}^t$$

4. R_{Prix}^4 : le prix d'un quartier q_j est formé d'un prix de base P_1 , qui est fonction de l'accessibilité de q_j , additionné d'un prix P_2 variant de 0 au prix de base P_1 , qui est une fonction linéaire du taux d'occupation D_j^t de q_j à t . $P_j^t = P_1^t + P_2^t$, avec $P_1^t = f(A_j^t)$ et $P_2^t = D_j^t \times P_1^t$, soit :

$$P_j^t = f(A_j^t) \cdot (1 + D_j^t)$$

4.3 Attractivité

Il s'agit de donner une forme à la fonction $s_{\alpha,\beta} : (A_j^t, EP_{i,j}^t) \rightarrow S_{i,j}^t$ des scores attribués par les fonctions urbaines aux quartiers. Elle est pour nous l'équivalent d'une fonction d'utilité.

Nous proposons dans un premier temps trois instances concurrentes pour ce module, et le score $S_{i,j}^t$ attribué par f_i à q_j à t pourra alors être égal à :

1. $R_{Attractivité}^1$: l'accessibilité seule :

$$S_{i,j}^t = A_j^t \tag{5.5}$$

C'est l'instance « géographique pure » : seule l'accessibilité compte dans le choix de localisation

2. une combinaison de l'accessibilité et du potentiel économique, tous les deux normalisés (l'accessibilité — resp. le potentiel économique — du quartier le plus accessible — resp. le plus synergique — vaut 1). Cette combinaison peut être :

- Linéaire ($R_{Attractivité}^2$) :

$$S_{i,j}^t = \alpha \times A_j^t + \beta \times EP_{i,j}^t \tag{5.6}$$

L'équation (5.6) indique que le score attribué par f_i à q_j à t dépend dans une proportion α de l'accessibilité de q_j et dans une proportion β du potentiel économique de q_j au sens de f_i . α et β sont deux paramètres globaux du modèle qui sont tels que $\alpha + \beta = 1$. Notre première instance est donc un cas particulier de ce schéma plus général, avec $\alpha = 1$ et $\beta = 0$.

- Non linéaire, par exemple :

$$S_{i,j}^t = A_j^t \times EP_{i,j}^t \quad (5.7)$$

qu'on peut généraliser en $(R_{Attractivité}^3)$:

$$S_{i,j}^t = (A_j^t)^\alpha \times (EP_{i,j}^t)^\beta \quad (5.8)$$

La formule (5.8) implique qu'une bonne évaluation sur les deux composantes est nécessaire pour qu'un quartier q_j soit bien noté par une fonction f_i , et qu'une valeur faible de l'une de ces deux variables est suffisante pour que le quartier soit mal noté.

4.4 Connaissance

Nous testerons deux instances de ce module :

1. $R_{Connaissance}^1$. Un ordre déterministe : les quartiers sont ajoutés à la liste $prefLocalisations_i^t$ de f_i selon l'ordre strict des scores S^t que la fonction leur a attribué. L'information dont disposent les fonctions pour se localiser est supposée parfaite.
2. $R_{Connaissance}^2$. Un ordre stochastique : la constitution de la liste ordonnée $prefLocalisations_i^t$ est itérative. A chaque ajout, chaque quartier q_j a une probabilité $\frac{S_{i,j}^t}{\sum_{k=0}^N S_{i,k}^t}$, égale au rapport de son score sur la somme de tous les scores attribués, d'être sélectionné comme le prochain quartier préférentiel.

Cet ordonnancement nous sert à tester l'incidence d'une connaissance imparfaite des acteurs lors de leur implantation dans la ville. Ce bruit dans l'ordonnancement des quartiers préférentiels pourrait aussi être introduit dans le module d'attractivité, en distinguant valeurs perçues du potentiel économique, et valeur réelle. A nos échelles de raisonnement, cela n'aurait que peu de sens de mimer de façon plus détaillée les processus cognitifs des acteurs.

4.5 Concurrence

Cette règle décide de l'ordre de passage des fonctions au moment de localiser les effectifs d'employés nouvellement arrivés à chaque itération. Cet ordre est important, car les fonctions peuvent désirer se localiser dans les mêmes quartiers, sans pour autant qu'il n'y ait de « place pour tout le monde ». Là encore nous proposons deux instances :

1. $R_{Concurrence}^1$: Les fonctions urbaines sont classées par ordre strict de leurs budgets. A chaque pas de temps, la fonction urbaine la plus riche passe la première, la plus pauvre la dernière.
2. $R_{Concurrence}^2$: A chaque pas de temps la liste contenant les fonctions urbaines actives est mélangée et l'ordre de passage des fonctions est aléatoire.

4.6 Localisation

Etant donnée la liste de quartiers $prefLocalisations_i^t$ maintenue par la fonction urbaine f_i , comment répartir l'effectif L_i^t de ses nouveaux arrivants à t parmi ces quartiers, sous la triple contrainte du budget de la fonction, du loyer des quartiers et de l'espace disponible ? Plusieurs stratégies de choix peuvent être postulées. Nous faisons la distinction entre :

- celles qui autorisent la séparation du nouvel effectif arrivant L_i^t en plusieurs groupes, répartissables dans des quartiers différents ;

- celles qui requièrent de localiser l'intégralité du nouvel effectif dans un seul et même quartier.

4.6.1 Avec localisations multiples autorisées

La localisation actif par actif de l'effectif arrivant est autorisée.

Première stratégie. $R_{Localisation}^1$: Les fonctions urbaines sont « aveugles », elles optimisent l'endroit placé et pas la quantité de population placée. Cela signifie qu'une fonction commence par localiser dans le premier quartier de sa liste *prefLocalisations* autant d'employés que le lui permettent son budget, le loyer du quartier, ainsi que le nombre d'emplacements libres qu'il contient. Puis elle passe au second quartier de sa liste *prefLocalisations*, et ainsi de suite. Ce mécanisme d'allocation est complètement déterministe.

Deuxième stratégie. $R_{Localisation}^2$: On introduit la possibilité qu'une fonction urbaine ne localise plus ses effectifs autant que possible dans le quartier préférentiel. Sur la base de son vecteur des scores attribués, S_i^t , chaque fonction f_i détermine la part de son effectif nouvellement arrivé L_i^t qu'elle va tenter de localiser dans chaque quartier. Celle-ci est égale à $\frac{S_{i,j}^t}{\sum_{k=0}^N S_{i,k}^t}$. Sa tentative de répartition se fait en proportions des attractivités des quartiers, car son budget ne lui permet pas nécessairement de ventiler tout son effectif. Elle considère alors les quartiers par ordre d'apparition dans sa liste, et tente de localiser l'effectif prévu.

4.6.2 Avec localisations dans un seul et même quartier

Les fonctions doivent localiser à chaque pas de temps tout le nouvel effectif arrivant « en bloc », dans un seul et même quartier.

Troisième stratégie. $R_{Localisation}^3$: Pour chaque fonction non-résidentielle, le premier quartier de la liste *prefLocalisations* pour lequel la localisation en bloc est possible (i.e dont la capacité d'accueil et le prix du loyer le permettent) est choisi.

Nous n'avons pour l'instant que des instances un peu naïves de cette règle de localisation. Des mécanismes économiquement plus sophistiqués permettraient notamment de maximiser le nombre d'employés localisés. Ces mécanismes impliquent des hypothèses géographiques fortes sur la nature des processus en jeu. Notre hypothèse directrice est que les qualités de la localisation importent plus que l'arbitrage monétaire.

Dans tous les cas, une règle non paramétrée pour le moment, et qui nous semble essentielle pour tenir compte de l'inertie des localisations sur le long terme, est *la priorité donnée aux fonctions déjà localisées* : tant qu'une fonction peut payer pour sa localisation à l'intérieur d'un quartier, celle-ci ne peut pas en être « chassée » par d'autres fonctions. En revanche, le prix du loyer d'un quartier peut augmenter avec l'augmentation des valeurs de ses déterminants (accessibilité, taux de variation de sa désirabilité). Par effet d'entraînement, cela peut conduire une fonction à déménager du fait d'une incapacité nouvelle à payer le loyer, et donc à « laisser sa place » à une autre.

Le tableau 1 récapitule les instances proposées pour chaque règle paramétrable de *simpop-Nano*.

Règle	Id	Description synthétique
R_{Accessibilité}	1	Shimbel exogène [Del08], avec vitesse évolutives ($\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesse} \rangle$).
	2	Shimbel endogène, avec graphe pondéré (avec $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesse} \rangle$).
	3	Shimbel endogène, avec graphe non pondéré (sans $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesse} \rangle$).
R_{Prix}	1	Le prix à t dépend de sa valeur à $t - 1$ et de son taux de désirabilité.
	2	Le prix est une fonction de l'accessibilité absolue, normalisée.
	3	Le prix est une fonction de l'accessibilité relative.
	4	Le prix est une fonction de l'accessibilité et du taux d'occupation.
R_{Attractivité}	1	L'accessibilité seule de j détermine le score $S_{i,j}^t$.
	2	$S_{i,j}^t$ est une fonction linéaire de A_j^t et de $EP_{i,j}^t$.
	3	$S_{i,j}^t$ est une fonction non linéaire de A_j^t et de $EP_{i,j}^t$.
R_{Connaissance}	1	Les quartiers sont considérés dans l'ordre strict des scores attribués.
	2	Les quartiers sont considérés dans un ordre stochastique basé sur des probabilités qui reflètent les scores attribués.
R_{Concurrence}	1	Les fonctions les plus riches passent d'abord.
	2	L'ordre de passage des fonctions est aléatoire.
R_{Localisation}	1	Localisation individu par individu, optimisation de l'endroit placé plutôt que de la quantité placée.
	2	Localisation individu par individu, avec répartition entre les quartiers proportionnelle aux scores attribués.
	3	Localisation « en bloc », avec un ordre de considération des quartiers qui est celui de <i>prefLocalisations</i> .

TAB. 1 – Descriptions synthétiques des instances proposées pour chacune des règles paramétrables de **simpopNano**.

5 Démarche et outils pour l'expérimentation

Nous pouvons voir sur la chronologie des réalisations (figure 4.1 page 103) que la réalisation des outils d'exploitation génériques présentés dans le chapitre précédent a été *postérieure* à celle de *simpopNano* et ses outils. Nous avons d'abord développé de premiers outils, fonctionnels mais moins découplés du modèle par rapport à ceux présentés dans le chapitre 4. Nous les présentons dans cette section.

Deux modes d'exécution de *simpopNano* sont possibles :

1. un mode avec une interface graphique interactive (cf. figure 5.4), qui permet à l'utilisateur de visualiser les sorties en temps réel (évolution des cartes et des courbes de valeurs des variables), mais aussi de réaliser dynamiquement des envois de messages aux agents ou de changer les valeurs des paramètres. Ce mode nous est utile pour déboguer, à des fins de démonstration, et pour visualiser le développement de la ville avec les paramétrages « performants » isolés par l'expérimentation en mode *batch*.
2. un mode *batch* qui permet d'enchaîner les simulations sans interface graphique, et nous l'utilisons pour les campagnes de simulation.

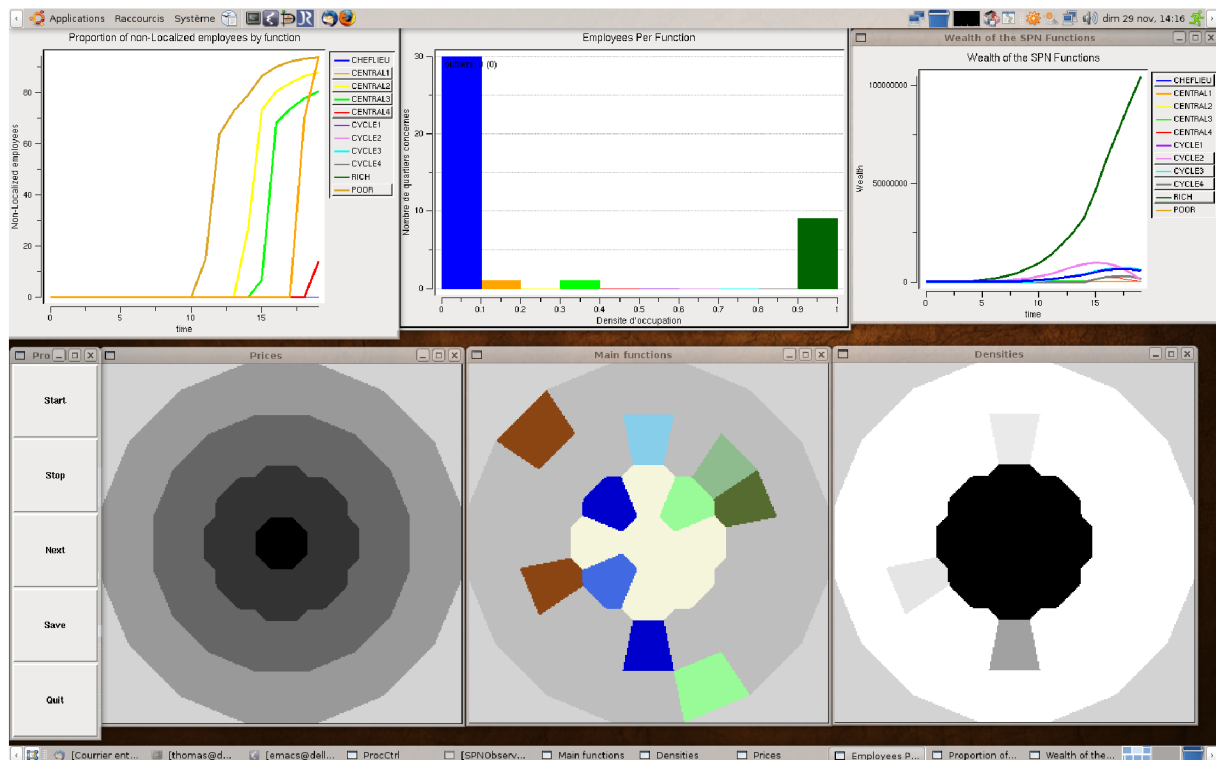


FIG. 5.4 – Exécution en mode graphique du modèle sur une géométrie-support de type européenne.

Le parti pris privilégié pour la visualisation des sorties est de s'appuyer sur des outils existants à partir d'un format d'échange. Cela restreint les visualisations interactives (les possibilités de *Swarm* sont un peu limitées sur ce point), mais cela autorise des formes de visualisation très souples à un coût de développement moindre. Le modèle enregistre les données produites sous plusieurs formats :

- dans des bases au format *DBF*, qui peuvent être ensuite exploitées sous *SIG* ;

- dans des fichiers textuels, qui sont ensuite exploités par un tableur, pour produire les rapports d'expériences (cf. section 5.3), et par GNUPLOT⁹, pour produire les tracés intégrés dans les rapports de simulations (cf. section 5.4).

5.1 Démarche d'expérimentation

Notre démarche lors d'une nouvelle *expérience*¹⁰ est la suivante :

1. La première étape consiste à déclarer les paramètres à faire varier, et à déclarer pour chacun les valeurs ou les intervalles de valeurs d'intérêt. Chaque paramétrage testé par l'expérience est exécuté consécutivement sur les deux graphes, et se voit attribuer des scores (cf. section 1.5) qui traduisent son aptitude à produire des répartitions spatiales différenciées entre les deux géométries. Ils nous permettent de comparer et classer les paramétrages et d'opérer un premier filtrage.
2. La seconde étape consiste à analyser en détail les simulations issues de ce filtrage. Nous cibons prioritairement les paramétrages performants, et nous inspectons le développement simulé, à l'aide du rapport de simulation. Des indicateurs importants, qui ne sont pas pris en compte dans les deux scores S_{Ordre} et S_{Ecart} , comme la structure centre-périphérie des répartitions spatiales, sont analysés à l'aide du rapport.

5.2 Automatisation du workflow

Pour la première de ces deux étapes nous utilisons un script d'expérimentation en *Perl* (distribué avec *Swarm*). Il prend comme arguments la liste des paramètres à faire varier, et pour chacun d'entre eux soit la liste exhaustive des valeurs à tester, soit un intervalle de valeurs et le pas de progression à l'intérieur de cet intervalle. L'exécution du script assure le lancement séquentiel de toutes les simulations possibles¹¹. Le calcul des coefficients de variation permettant de calculer les scores de chaque simulation est fait à l'exécution, les valeurs sont écrites dans des fichiers d'expérience « globaux », à raison d'une ligne par simulation et d'une colonne par date simulée. Ces fichiers sont ensuite traités en fin d'expérience pour produire un *rapport d'expérience* (cf. section 5.3).

Pour la seconde étape, le programme crée, lors du lancement de chaque nouvelle simulation, un répertoire nommé d'après le paramétrage et l'heure de lancement¹². Le stockage des données produites est logiquement organisé dans le système de fichiers. Cela facilite l'extraction et la manipulation des données associées à une simulation particulière, avec des outils standard comme *grep* et *find*. En plus des fichiers contenant les données associées à chaque date simulée, un *template* de script *Bash* assurant la production d'un *rapport de simulation* à partir de ces fichiers (cf. section 5.4) est copié dans le répertoire.

Toutes les étapes de l'expérience sont centralisées sur une seule et même machine et sont pilotées par un script *Bash*.

⁹<http://www.gnuplot.info/>

¹⁰Nous nous référons aux définitions données dans la section 6.1 du chapitre 4

¹¹implicitement définies par la jointure des ensembles de valeurs définis pour chacun des paramètres

¹²par exemple le répertoire 1.7_23.41.59_M0_A3.P15_At2_K1_C2.L2.Q50000 correspond à une simulation lancée le 1er juillet à 23h41m59s, avec le graphe de ville US (M=0), l'instance 3 de la règle d'accessibilité, 15 de prix, 2 d'attractivité, 1 de connaissance, 2 de concurrence, 2 de localisation, et avec $C_0 = 50.000$

5.3 Rapports d'expériences

Les traitements des fichiers associés à une expérience, nécessaires pour comparer les performances des paramétrages, sont pour l'instant faits « à la main » avec le tableur *OpenOffice Calc*. A cette étape, il s'agit de calculer les scores quantifiant la qualité de la différenciation des trajectoires générées, et de trier les paramétrages. L'automatisation de cette étape n'est pas effective mais ne pose pas de problème en principe. Cependant, notre but n'est pas de développer plus en avant un outil *ad-hoc*, mais de :

- porter les E/S de *simpopNano* sur un SGBD spatial, comme pour *Simpop2*.
- tirer profit des prototypes de langage de script, de wiki d'expérimentation, et d'interface aux algorithmes de calibrage automatique (cf. section 7 chapitre 4) pour *simpopNano*. L'expérimentateur aura toujours le choix entre utiliser le langage de composition de rapports, ou exporter les données de la BD pour les traiter avec un tableur, comme c'est le cas actuellement.

5.4 Rapports de simulations

L'exemple du *Navigateur Simpop2* (section 6 du chapitre 4) a illustré les coûts liés à la maintenance et à l'évolution, pour une petite équipe, d'une application dédiée et indépendante pour analyser les sorties de modèles. Nous avons donc opté pour la production de rapports HTML visualisables dans un navigateur web. Un rapport hypertexte contient autant de pages que de dates simulées, les pages associées à des dates consécutives sont chaînées, et la page d'index du rapport permet un accès direct aux données associées à chaque date. Cette page d'index contient en outre :

1. le tableau des valeurs des scores à chaque date, et leurs courbes d'évolution dans le temps simulé.
2. des séries temporelles de cartes de la répartition spatiale :
 - des densités ;
 - des prix ;
 - des fonctions majoritaires dans chaque quartier ;
 - des différentes fonctions (répartitions relatives pour une fonction donnée.

Des images *raster* de ces cartes sont enregistrées pendant la simulation, que le modèle s'exécute en mode graphique ou en mode batch. La juxtaposition des cartes d'une même série forme des chronologies qui permettent une perception immédiate.

3. des graphes de l'évolution de la densité et du prix en fonction de la distance au centre, tracés par GNUPLOT.

A terme, ces rapports doivent être automatiquement déposés sur le wiki d'expérimentation dédié, de façon à ce que les membres de l'équipe puissent y réagir de façon asynchrone et décentralisée.

6 Expérimentations

6.1 Cohérence des mécanismes implementés

Des vérifications préliminaires sont nécessaires pour s'assurer de la *correction* des mécanismes implémentés (cf. « *build the model right* » [Bal98]). Nous n'avons pas formalisé de protocole de

test, et nous ne rentrons pas dans les détails de ces vérifications¹³.

L'étape venant immédiatement après consiste à s'assurer de la reproduction de propriétés « élémentaires » et universelles sur la période considérée, et qui doivent donc être vérifiées pour les deux géométries. Ces propriétés, qui ne sont pas celles dont nous allons tester les conditions d'apparition, mais que notre modèle doit respecter *a minima*, incluent :

1. $P1$: Une croissance chronologique depuis le centre ;
2. $P2$: Sur la période considérée, la croissance de la ville est accréitive : elle « pousse par ses bords » ;
3. $P3$: Il ne doit pas y avoir « trop » de non-localisations.

Nous avons indiqué que plusieurs instances concurrentes peuvent être postulées pour chacune des règles isolées. Devons-nous tester toutes leurs combinaisons pour vérifier ces propriétés de base ?

$P1$ est assurée par construction : dans la configuration initiale, l'intégralité des effectifs des fonctions actives initialement est localisée dans le quartier central du graphe et un quartier connexe de la première ceinture.

$P2$ est un résultat des instances des règles **R_{Accessibilité}** et **R_{Attractivité}** mises en place et de la situation initiale. Nous pouvons la prouver par raisonnement : dans toutes les instances proposées de **R_{Attractivité}**, les scores attribués aux quartiers sont fondés sur leur accessibilité et sur leur potentiel économique. Toutes les instances de **R_{Accessibilité}**, exogènes ou endogènes, engendrent des champs où l'accessibilité diminue avec la distance au centre, du fait de la situation initiale où les fonctions sont localisées dans le quartier central et dans un quartier connexe. Nous pouvons en déduire que, tant que faire se peut, les fonctions se localiseront d'abord dans les quartiers les plus près du centre qui, par construction dynamique et avec cette situation initiale, sont les plus accessibles.

L'autre facteur intervenant dans **R_{Attractivité}** est le potentiel économique EP . Si nous ne postulons pas d'orientations ségrégratives explicites dans les synergies paramétrées pour chaque fonction par son vecteur **pref** (c'est le cas entre les deux fonctions résidentielles, ce qui ne veut pas dire qu'il n'y a pas de ségrégation, mais celle-ci est le résultat des variations de prix et de budgets), alors les quartiers déjà colonisés sont nécessairement mieux notés que les quartiers vides. Il s'en suit qu'avec les instances de **R_{Accessibilité}** et **R_{Attractivité}** proposées, la colonisation de proche en proche de l'espace est une propriété garantie en l'absence d'orientations synergiques répulsives. Si nous intégrons des comportements répulsifs (en fixant des valeurs de **pref** négatives), alors la propriété n'est plus garantie par ce raisonnement.

Enfin $P3$ est un exemple de propriété qu'il est difficile de prouver formellement à partir des spécifications du modèle. Il faut d'abord la préciser quantitativement (combien veut dire « pas trop » ?) et il faudrait ensuite vérifier que pour toutes les combinaisons possibles de valeurs des paramètres, aucune exécution ne viole cette propriété. Typiquement cette propriété ne peut pas être prouvée *a priori* mais doit être vérifiée *a posteriori* pour les simulations réalisées.

Nous allons maintenant illustrer le matériel présenté avec deux premières expériences que nous avons réalisé. La question qui motive ces premières expérience est de savoir s'il existe une ou plusieurs combinaisons des instances de règles présentées dont l'exécution vérifie l'hypothèse (5.1). Pour illustrer la variété des usages possibles du modèle, dans la première expérience, nous

¹³Notre avancement à cette étape se fait à l'aide d'un débogueur, simulation par simulation, et en doublant les sorties graphiques de sorties console verbeuses (itérations successives des algorithmes compliqués de localisation, de paiement, etc.) Systématiser et automatiser la vérification des mécanismes implémentés serait assurément une piste à suivre si le projet perdure, mais lourde à mettre en place.

ne considérons que les fonctions non-résidentielles, et dans la seconde les fonctions résidentielles uniquement.

6.2 Expérience 1 : avec les fonctions non-résidentielles uniquement

6.2.1 Questions

Outre les différences de répartition des densité et de prix, nous cherchons également à reproduire les différences de répartition entre les activités économiques. Nous avons vu que le zonage est plus marqué aux Etats-Unis : les coefficients de variations (CV) des fonctions devraient donc être plus forts sur la géométrie américaine. Existe-t-il des combinaisons d'instances des règles qui soient en mesure de produire ces motifs de zonage plus marqué, sans tenir compte de logiques synergiques très directives ?

6.2.2 Principe de l'expérience

Nous considérons le profil d'évolution des effectifs de fonctions et de budgets présentés sur la figure 5.5. Nous gardons également les mêmes orientations synergiques entre fonctions (vecteurs **pref_i**) pour les deux géométries. Celles-ci n'incluent que des attractions et pas de répulsions explicites. Nous testons toutes les combinaisons possibles d'instances proposées pour chacune des six règles paramétrables.

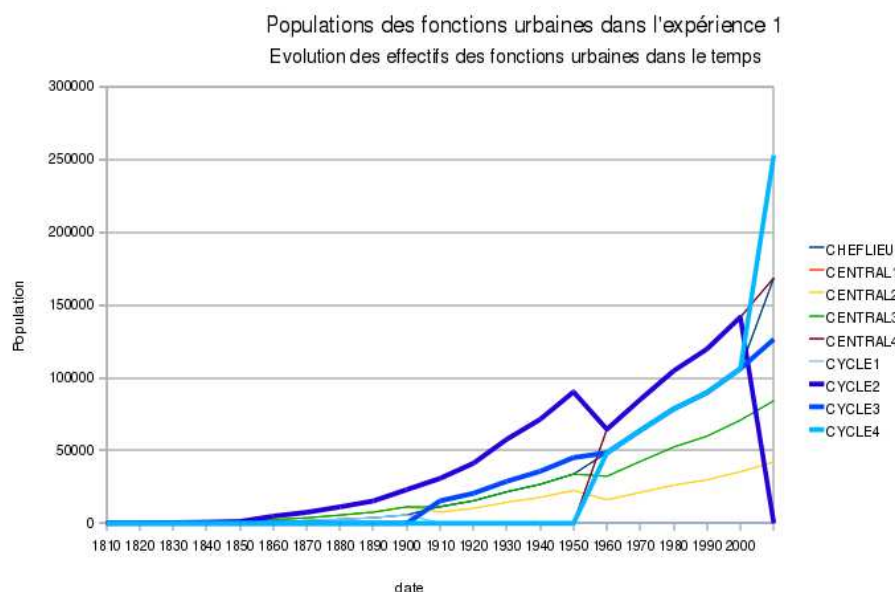


FIG. 5.5 – Evolution au cours du temps des effectifs des fonctions urbaines dans l'expérience « Non-résidentielles uniquement ».

6.2.3 Situation initiale et paramétrage

La configuration spatiale en 1800 que nous considérons, définie par les géographes, est la suivante :

- La population totale se répartit en 20% de CENTRAL1, 20% de CENTRAL2, 20% de CENTRAL3, 10% de CYCLE1, 20% de CYCLE2, et 10% de CHEF-LIEU ;

- Le quartier au centre des deux réseaux est déjà colonisé par les fonctions, de même qu'un quartier connexe du quartier central, tiré au hasard parmi l'ensemble des quartiers connexes. La répartition des fonctions parmi ces deux quartiers se fait dans les proportions données par la figure 5.6.
- Tous les autres quartiers sont vides.

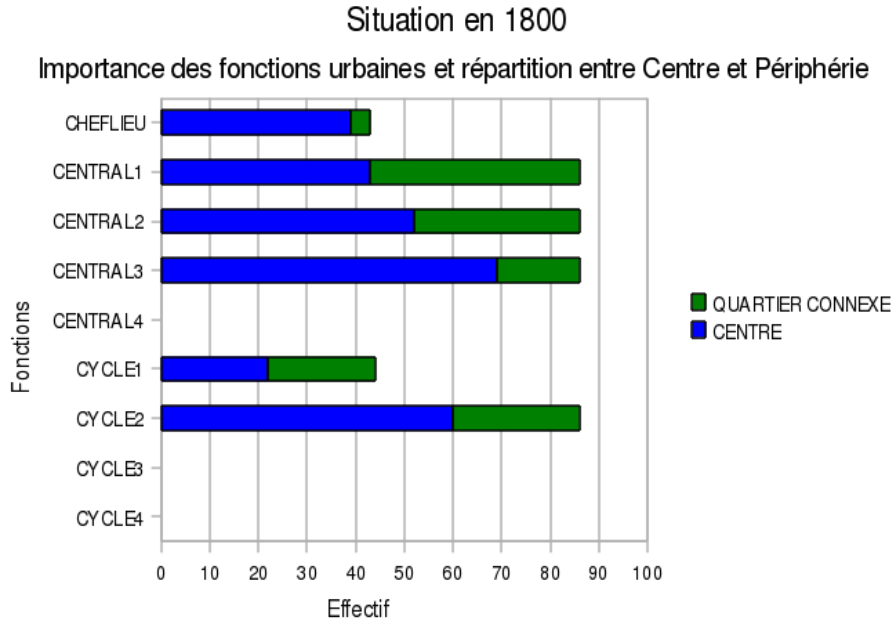


FIG. 5.6 – Répartition des fonctions urbaines entre quartier central et quartier connexe à celui-ci, pour la situation initiale (1800) considérée dans l'expérience « Non-résidentielles uniquement ».

Le tableau 2 présente le jeu de valeurs de paramètres recouverts par cette expérience.

Nombre de fonctions M	2
Nombre de quartiers N	41
Capacité des quartiers $C_j^{t=0}$	{30.000, 40.000, 50.000}
Accessibilité	{1,2,3}
Prix	{1,2,3,4}
Attractivité	{1,2,3}
Connaissance	{1,2}
Concurrence	{1,2}
Localisation	{1,2,3}

TAB. 2 – Instances des règles utilisées dans l'expérience 1 « Non-résidentielles uniquement ». Toutes les combinaisons d'instances sont testées.

6.2.4 Indicateurs observés et visualisations

1296 paramétrages différents¹⁴ doivent être testés pour cette expérience. Chacun doit être testé sur les deux géométries, puisqu'au final ce sont *les différences de sorties entre géométries pour un même paramétrage* qui nous intéressent. Cela implique donc 2592 simulations.

Chaque paramétrage est évalué à l'aide de trois scores. Deux d'entre eux sont basés sur les coefficients de variation spatiale (CV) des variables qui nous intéressent. Le troisième est un score de « contrôle » :

1. le score S_{Ordre} propose une vision plus « qualitative » de la performance des développements simulés. On a : $S_{Ordre} = S_{Ordre_Densités} + S_{Ordre_Prix} + S_{Ordre_CENTRAL} + S_{Ordre_CYCLE}$, avec :
 - $S_{Ordre_Densités}$, le nombre de dates de la simulation pour lesquelles $CV_{Densités,Europe} > CV_{Densités,US}$. $0 < S_{Ordre_Densités} < 21$.
 - S_{Ordre_Prix} , le nombre de dates de la simulation pour lesquelles $CV_{Prix,Europe} > CV_{Prix,US}$
 - $S_{Ordre_CENTRAL}$, le nombre de dates de la simulation pour lesquelles $CV_{CENTRAL,US} > CV_{CENTRAL,Europe}$
 - S_{Ordre_CYCLE} , le nombre de dates de la simulation pour lesquelles $CV_{CYCLE,US} > CV_{CYCLE,Europe}$

Ce score S_{Ordre} est égal à la somme du nombre de dates simulées pour lesquelles la relation d'ordre entre valeurs US et Europe d'un même coefficient de variation est respectée. Plus le score est grand, meilleur est le paramétrage. Chacun des quatre termes de la somme varie entre 0 et 21 (21 dates simulées), et on a donc $0 \leq S_{Ordre} \leq 84$.

2. le score S_{Ecart} propose une vision plus « quantitative » de la performance des développements simulés. Il est construit sur le même modèle que S_{Ordre} , mais il somme les *écarts* entre les courbes des coefficients de variation.

$$S_{Ecart} = S_{Ecart_Densités} + S_{Ecart_Prix} + S_{Ecart_CENTRAL} + S_{Ecart_CYCLE}. S_{Ecart} \in \mathbb{R}.$$

3. Un score de contrôle $S_{TauxLoc}$, qui mesure le pourcentage de l'effectif entrant dans la ville qui a été effectivement localisé en situation finale. Il doit nous permettre de vérifier la propriété P3, dont nous avons dit qu'elle devait être évaluée *a posteriori*.

Nous regardons les coefficients de variation sur les fonctions centrales et cycles. Pour cela nous calculons à chaque date de la simulation non pas la valeur du coefficient de chaque fonction, mais la moyenne du coefficient sur toutes les fonctions de la famille (Centrales / Cycles).

6.2.5 Résultats

Les résultats sont mauvais

Nous sommes dans l'incapacité de générer plus de zonage des fonctions pour l'espace américain. Pour créer de la ségrégation spatiale *entre fonctions*, indépendamment de la géométrie, nous pouvons « passer par le prix » : l'idée est que les fonctions de même classe ont des budgets de même ordre de grandeur, qui leur permettent de se localiser dans un ensemble de quartiers d'accessibilités équivalentes (dans la mesure où le prix est indexé sur l'accessibilité, ce qui est le cas des instances de \mathbf{R}_{Prix}) proposées. En revanche, si nous ne réussissons pas à obtenir de très bons scores, c'est sûrement parce que rien dans les mécanismes actuels ne nous semble pouvoir générer ce zonage plus marqué aux US, si l'on garde les mêmes profils de synergie dans

¹⁴=3(Accessibilité)×4(Prix)×3(Attractivité)×2(Connaissance)×2(Concurrence)×2(Localisation)×3(Capacité initiale des quartiers)

les deux continents. Au contraire, la géométrie européenne pourrait *a priori* engendrer plus de ségrégation, parce qu'elle est plus différenciée en termes d'accessibilités.

La résolution de notre discrétisation spatiale et la capacité des de nos unités spatiales font que jusqu'en 1900, il n'y a que très peu de quartiers colonisés dans les simulations et cela n'a que peu de sens d'utiliser des coefficients de variation pour « résumer » les configurations spatiales simulées. On peut questionner la significativité des comparaisons en l'état actuel pour la période (1800-1900). Deux solutions paraissent immédiatement envisageables :

1. Considérer d'autres indicateurs pour comparer les sorties, par exemple une simple mesure de distance entre les valeurs de la densité dans les deux quartiers ;
2. Calculer les scores à partir de 1900 uniquement, date où le profil d'évolution des populations injecté implique un changement d'amplitude de la colonisation spatiale. Restreindre les observations $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Densités} \rangle$, $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Prix} \rangle$ et $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Activités} \rangle$ au seul vingtième siècle est plus certainement justifiable : les villes étaient-elles si différentes dans leurs formes avant le vingtième siècle ? La révolution automobile et son intégration urbaine ne se produisent qu'au début du vingtième siècle, et c'est surtout à cette époque que les différences d'occupation territoriale deviennent remarquables. Le tracé des réseaux est certes déjà différent, le plan est peu étendu à cette époque, et dans son travail de délimitation des vitesses sur des plans de villes évolutifs, [Del08] ne considère ainsi pour les deux continents qu'une ville composée d'un quartier central et d'une première ceinture pour toute la période 1800-1900. En suivant cette piste, la question à se poser devient : que se passe-t-il si nous ne calculons les scores définis qu'à partir de 1900 ? Est-ce que ce sont les mêmes paramétrages qui arrivent en tête du classement ?

Si nous nous restreignons à regarder uniquement les coefficients de variation de la densité et des prix (sans chercher à reproduire la compartimentation plus marquée de la ville US, et donc en écartant les coefficients de variation des fonctions CENTRAL et CYCLE), et qu'en plus nous calculons les scores en nous restreignant à la période 1900-2000 (11 dates)¹⁵, nous pouvons faire les constats suivants :

1. 64 paramétrages sur les 1296 testés (5%) obtiennent un score optimal pour S_{Ordre} .
2. Parmi ces 64 paramétrages, il existe des paramétrages avec l'instance $R^3_{\text{Accessibilité}}$, laquelle tient seulement compte de $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Réseaux} \rangle$, et pas de $\langle \text{Obs}, \text{Villes}, \text{Vitesses} \rangle$. *Il est donc possible de générer des schémas de répartition plus inégalitaires sur le réseau européen que sur le réseau américain, uniquement sur la base des différences topologiques des plans de villes, et ce indépendamment des vitesses de circulation, sur toute la durée simulée.* C'est un premier résultat important.
3. Pour ce même score S_{Ordre} 698 paramétrages (54%) obtiennent un score $S_{\text{Ordre}} \geq 11$, 615 paramétrages (47%) un score $S_{\text{Ordre}} \geq 12$. La valeur 11 est pour ce score le point de neutralité : pour la moitié des étapes du développement la relation d'ordre est correcte, pour l'autre moitié elle est incorrecte.
4. La performance en moyenne de l'ensemble des paramétrages est de 5,74/11 pour les densités et de 5,31/11 pour les prix : l'ensemble d'instances proposé réussit, en moyenne, mieux à simuler la différenciation des densités que la différenciation des prix.

A contrario, nous pouvons regarder le développement simulé par un paramétrage obtenant de mauvais scores. Les figures 5.9 et 5.10 pour la ville européenne, et ?? et ?? pour la ville états-unienne, illustrent le développement simulé avec un tel paramétrage (obtenant 0 pour S_{Ordre}).

¹⁵on a $S_{\text{Ordre}} = S_{\text{Ordre_Densités}} + S_{\text{Ordre_Prix}}$ et $0 \leq S_{\text{Ordre}} \leq 22$

Nous voyons que même pour les paramétrages obtenant ces plus mauvais scores, la colonisation de l'espace intra-urbain vérifie les propriétés élémentaires mentionnées précédemment (contiguïté du développement, décroissance de la densité et des prix depuis le centre vers la périphérie). Elle est « irréaliste » dans le sens où la ville se développe partout au même rythme, et est étalée spatialement dès les premières phases du développement simulé.

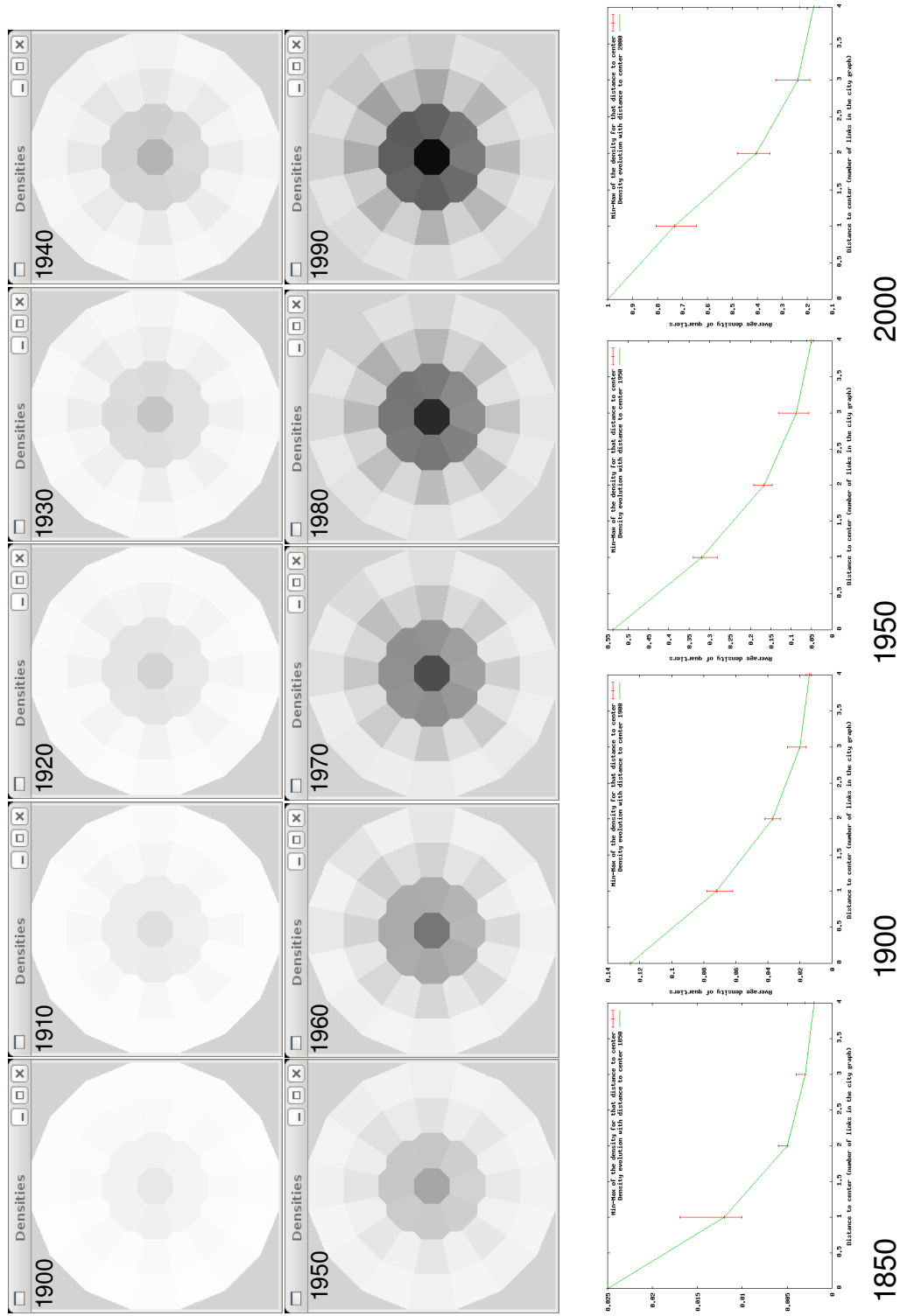


FIG. 5.7 – Evolution de la répartition spatiale des densités pour le plus mauvais développement simulé, sur une géométrie de ville européenne, au sens d'une évaluation basée sur SO_{ordre} d'abord, sur SE_{cartes} ensuite. La colonisation de l'espace intra-urbain n'est pas « irréaliste » et vérifie les propriétés élémentaires (centre vers périphérie, continuité) mentionnées précédemment. L'intensité de la coloration (sur une échelle de gris) est proportionnelle au ratio des valeurs des densités parmi les quartiers.

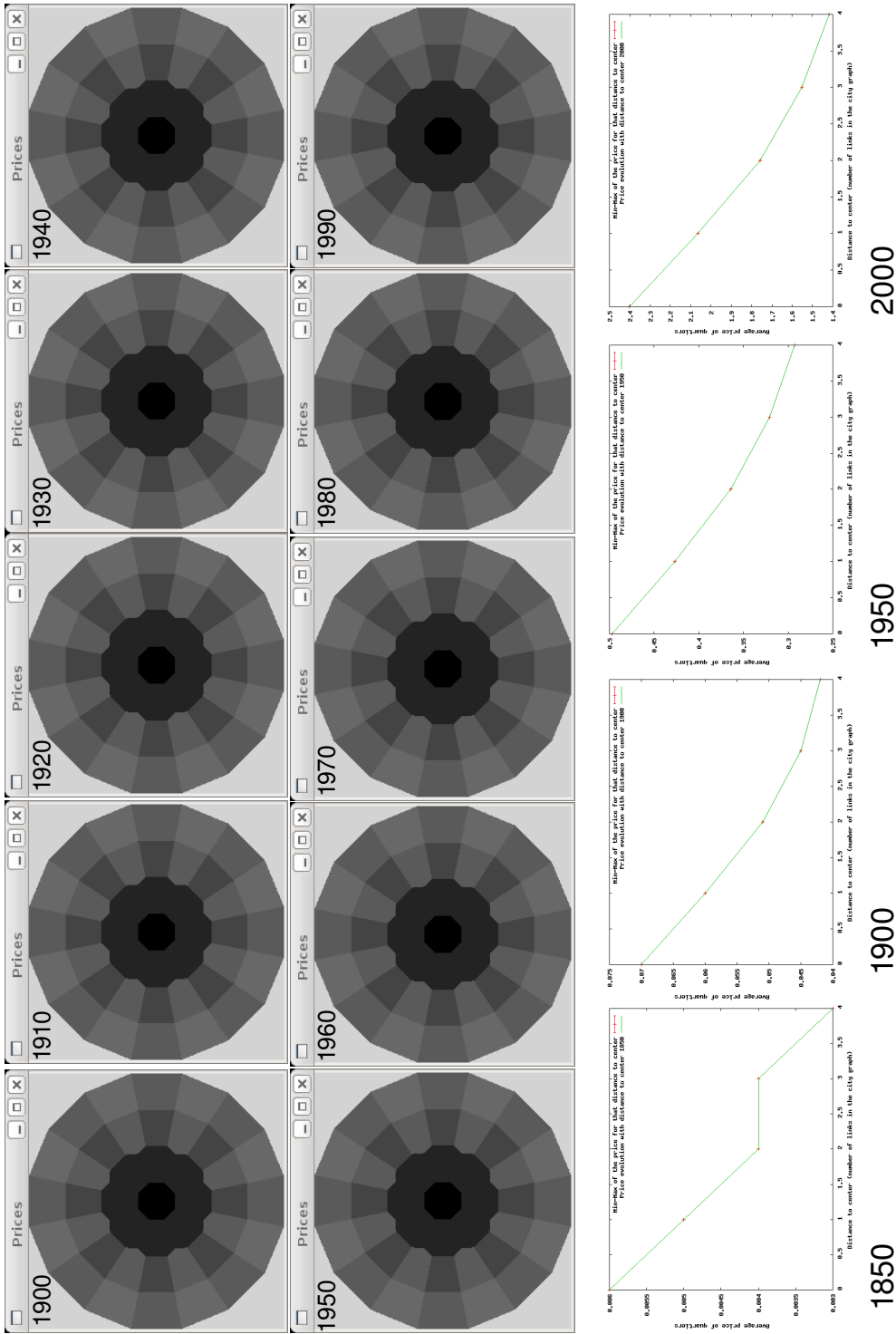


FIG. 5.8 – Evolution de la répartition spatiale des prix pour le plus mauvais développement simulé, sur une géométrie de ville européenne, au sens d’une évaluation basée sur SO_{dre} d’abord, sur SE_{cards} ensuite. La colonisation de l’espace intra-urbain n’est pas « irréaliste » et vérifie les propriétés élémentaires (centre vers périphérie, continuité) mentionnées précédemment. L’intensité de la coloration (sur une échelle de gris) est proportionnelle au ratio des valeurs des prix parmi les quartiers.

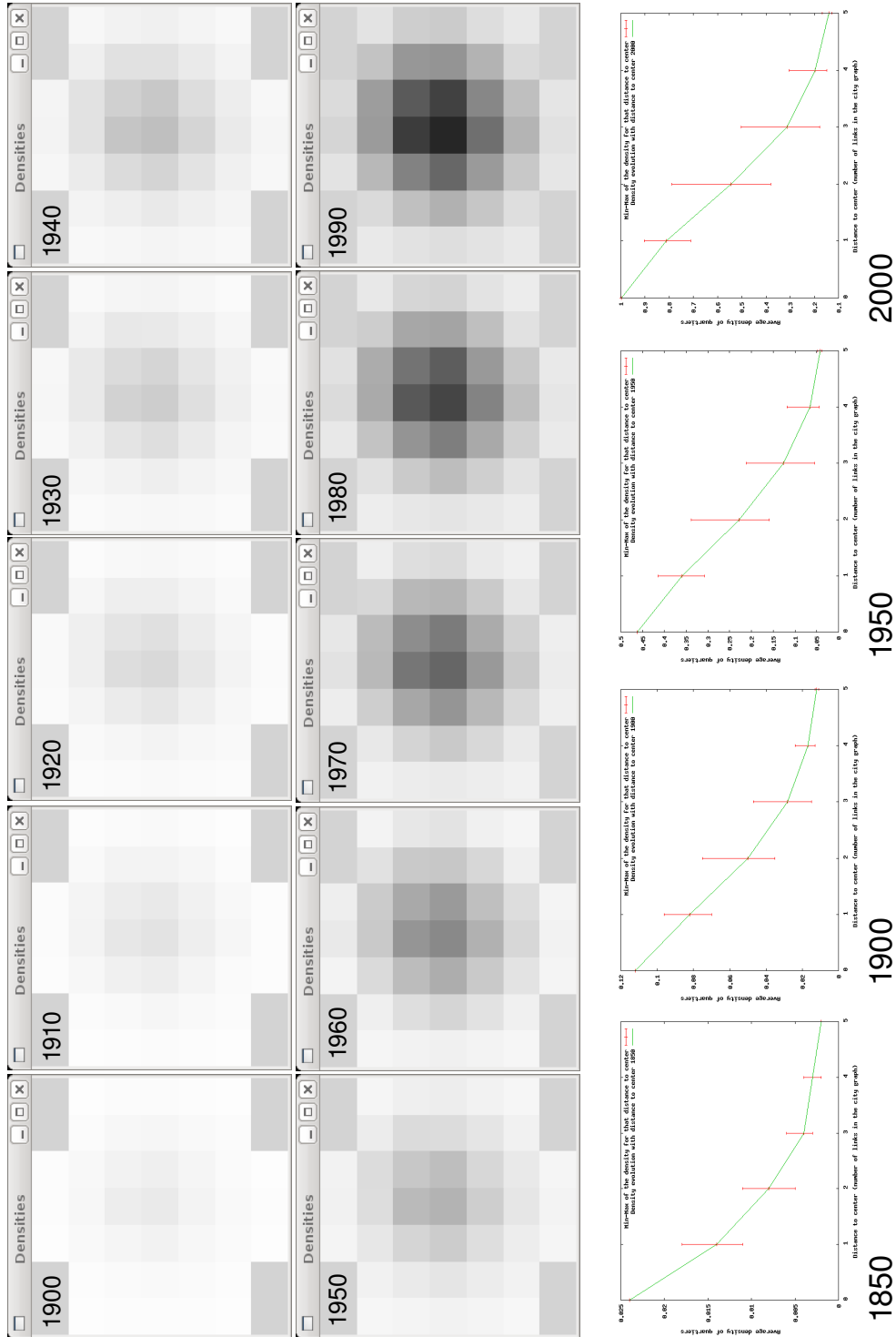


FIG. 5.9 – Evolution de la répartition spatiale des densités pour le plus mauvais développement simulé, sur une géométrie de type états-unienne, au sens d'une évaluation basée sur S_{Ordre} d'abord, sur S_{Ecart} ensuite. La colonisation de l'espace intra-urbain n'est pas « irréaliste » et vérifie les propriétés élémentaires (centre vers périphérie, continuité) mentionnées précédemment. L'intensité de la coloration (sur une échelle de gris) est proportionnelle au ratio des valeurs des densités parmi les quartiers.

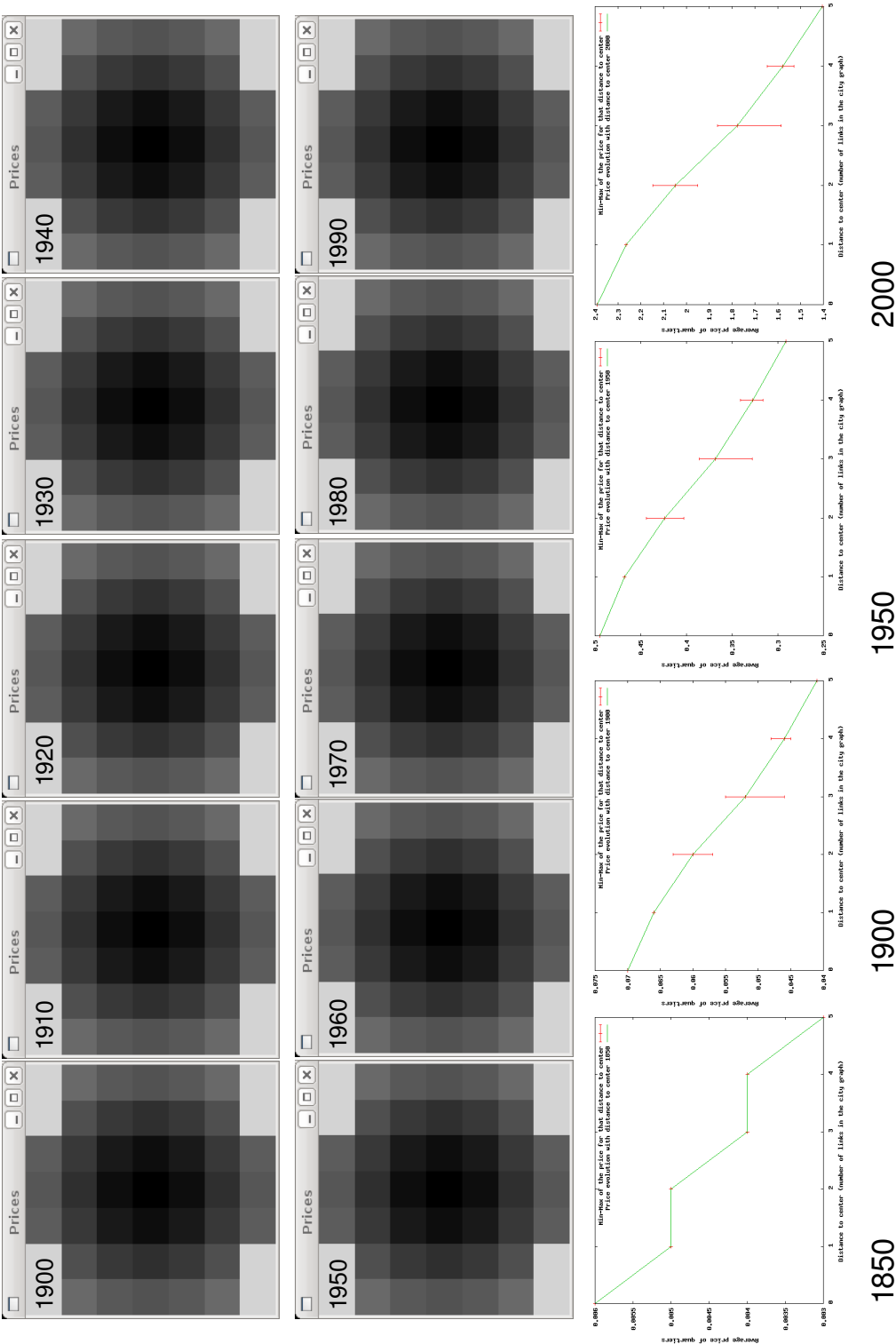


FIG. 5.10 – Evolution de la répartition spatiale des prix pour le plus mauvais développement simulé, sur une géométrie de type états-unienne, au sens d'une évaluation basée sur SO_{dre} d'abord, sur SE_{cards} ensuite. La colonisation de l'espace intra-urbain n'est pas « irréaliste » et vérifie les propriétés élémentaires (centre vers périphérie, continuité) mentionnées précédemment. L'intensité de la coloration (sur une échelle de gris) est proportionnelle au ratio des valeurs des prix parmi les quartiers.

Nombre de fonctions M	2
Nombre de quartiers N	41
Capacité des quartiers $C_j^{t=0}$	{40.000, 50.000}
Accessibilité	{1,2,3}
Prix	{1,2,3,4}
Attractivité	1
Connaissance	1
Concurrence	{1,2}
Localisation	{1,2}

TAB. 3 – Instances de règles testées pour l'expérience 2 « Résidentielles uniquement ». Toutes les combinaisons d'instances sont testées.

6.3 Expérience 2 : avec les fonctions résidentielles uniquement

6.3.1 Principe de l'expérience

Nous considérons les deux fonctions résidentielles RICH et POOR, avec :

- un profil unique d'évolution temporelle de leurs populations, qui est celui donné par la figure 5.1 page 151 ;
- un profil unique d'évolution de leurs budgets ;

Ces deux profils sont les données injectées en entrée ($R_{Contexte}$) et traduisent $\langle \text{Hyp, Villes, ContraintesSys} \rangle$. Nous testons les instances des règles **R_{Accessibilité}** (avec prise en compte ou non des vitesses), **R_{Prix}**, **R_{Concurrence}** (les riches sont systématiquement prioritaires (spéculation foncière) ou pas) et de **R_{Localisation}** (uniquement les instances permettant la localisation individu par individu).

Les deux autres règles, **R_{Attractivité}** et **R_{Connaissance}** sont fixées sur leurs instances numéro 1. Avec $R_{Attractivité}^1$ nous faisons preuve de parcimonie en supposant que les fonctions résidentielles *ne sont guidées que par la recherche de l'accessibilité* (pas de logique de ségrégation à la Schelling). Avec $R_{Connaissance}^1$ nous postulons que l'état des quartiers de la ville est connu parfaitement des fonctions lorsqu'elles se localisent.

6.3.2 Situation initiale et paramétrage

La configuration spatiale en 1800 que nous considérons, définie avec les géographes, est la suivante :

- La population résidentielle totale se répartit en 90% de POOR et 10% de RICH
- Le quartier au centre des deux réseaux est déjà colonisé par les deux fonctions. 20% de l'effectif de la fonction résidentielle RICH et 90% de la fonction résidentielle POOR y sont localisés.
- Un quartier connexe du quartier central, tiré au hasard parmi l'ensemble des quartiers connexes, est également déjà colonisé. Le reste des effectifs des deux fonctions y sont localisés (soit 80% de l'effectif RICH et 10% de l'effectif de POOR).
- Tous les autres quartiers sont vides.

Le tableau 3 présente le jeu de valeurs de paramètres recouverts par cette expérience.

6.3.3 Indicateurs observés et visualisations

96 paramétrages différents¹⁶ doivent être testés pour cette expérience. Chacun doit être testé sur les deux géométries, puisqu'au final ce sont *les différences de sorties entre géométries pour un même paramétrage* qui nous intéressent. Nous mesurons les écarts entre les sorties obtenues avec les scores S_{Ordre} et S_{Ecart} (cf. section 1.5 et expérience précédente). Ces scores nous servent à filtrer l'ensemble des paramétrages différents testés. Cette expérience requiert 192 simulations.

6.3.4 Résultats

Le meilleur paramétrage trouvé obtient un score de 46/63 pour S_{Ordre} . Cela signifie que sur 63 comparaisons¹⁷, le paramétrage génère une bonne relation d'ordre dans 46 cas. Les figures 5.11 et 5.12 illustrent les trajectoires obtenues avec le meilleur paramétrage trouvé au sens du score S_{Ordre} .

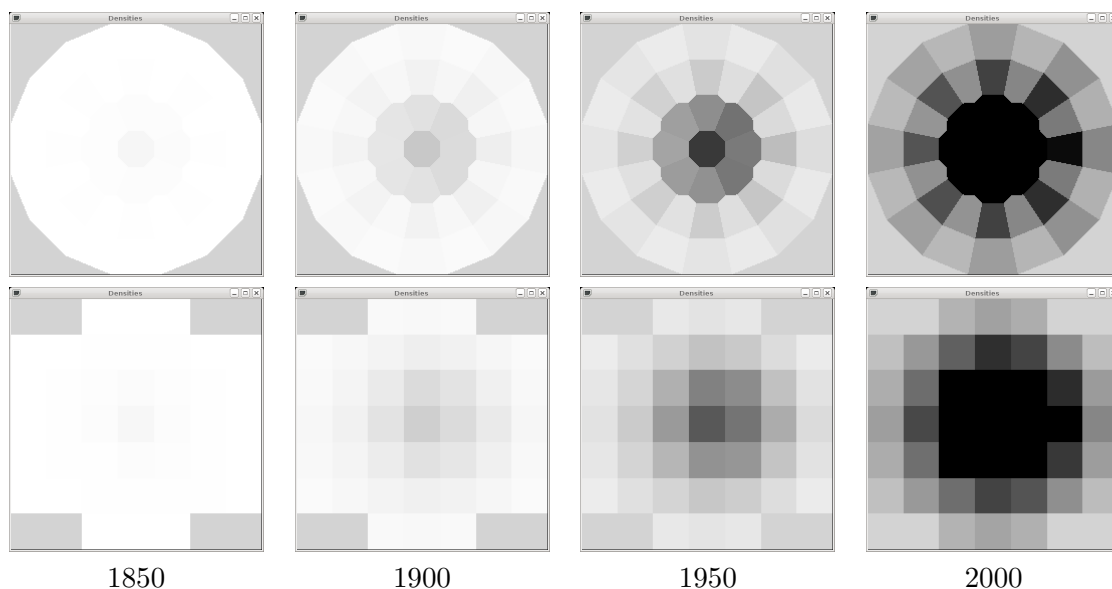


FIG. 5.11 – Développements simulés de la répartition spatiale des densités, par le meilleur paramétrage au sens du score S_{Ordre} qui évalue la capacité du modèle à générer des répartition des densités et des prix plus diluées sur la géométrie américaine, et plus de ségrégation spatiale entre classes sociales.

Dans la section 1.5, nous avons posé le problème de la définition de critères quantitatifs pour déterminer les plages de valeurs de scores cohérentes avec le phénomène observé. Lorsque l'on évalue le modèle avec les trois scores présentés, il existe des simulations dont le score est inférieur à 32 (0.5 une fois normalisé), ce qui signifie que pour plus de la moitié des comparaisons, la relation d'ordre entre coefficients est inversée. Pour plus de la moitié des configurations observées, le modèle discrimine mal les deux géométries. En supposant, avec un critère d'évaluation extrêmement relâché, qu'une simulation *valide* est une simulation qui génère pour au moins la moitié des dates, de bonnes relations d'ordre entre les coefficients, cela signifie qu'il existe dans notre expérience des simulations *invalides*. Ces « mauvais » paramétrages permettent de répondre négativement à une autre question : l'ensemble d'instances proposées ne permet pas de reproduire, dans tous les cas, les différences observées.

¹⁶ $= 3(\text{Accessibilité}) \times 4(\text{Prix}) \times 2(\text{Concurrence}) \times 2(\text{Localisation}) \times 2(\text{Capacité initiale des quartiers})$

¹⁷ 3×21 : 3 indicateurs, dont les valeurs sont comparées entre les deux géométries, pour 21 dates.

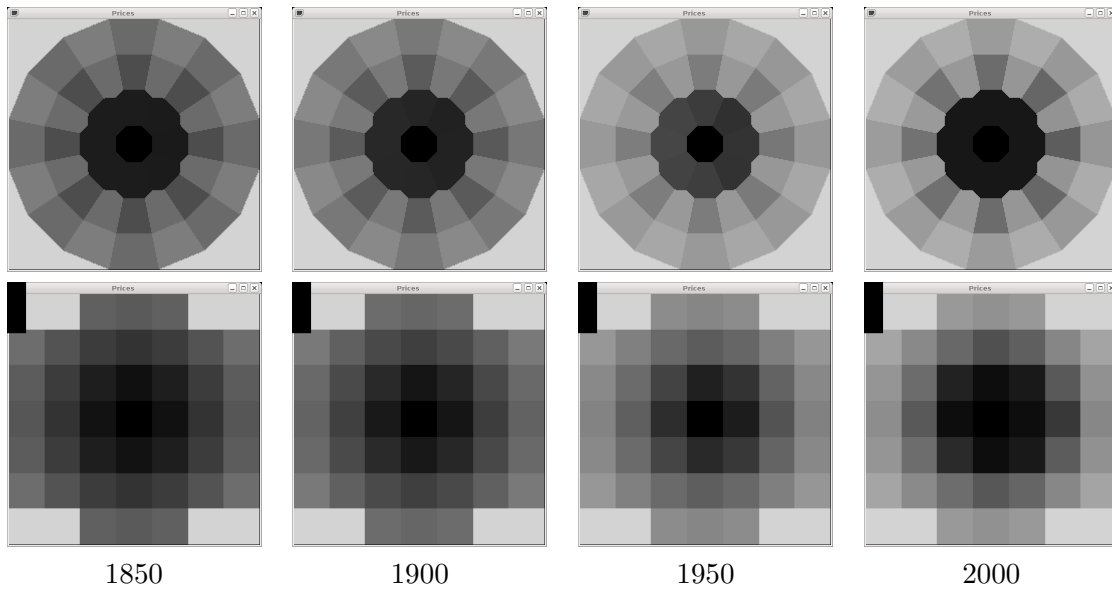


FIG. 5.12 – Développements simulés de la répartition spatiale des prix, par le meilleur paramétrage au sens du score S_{Ordre} qui évalue la capacité du modèle à générer des répartitions des densités et des prix plus diluées sur la géométrie américaine, et plus de ségrégation spatiale entre classes sociales.

6.4 Poursuite de l'expérimentation et de l'évaluation

Ces deux expériences superficielles n'ont pour but que d'illustrer les potentialités du modèle réalisé. Nous ne pouvons pas conclure à ce stade de l'expérimentation sur les apports géographiques éventuels du modèle. D'autres expériences doivent être faites, et les critères d'évaluation doivent être affinés. Surtout, la solution développée permet de produire rapidement de gros volumes de données, mais tout le travail de fouille de données et d'analyses statistiques reste à faire. De plus, plusieurs limites dans l'expérimentation menée jusqu'à présent sont identifiables et devront être franchies :

1. Nous n'avons travaillé qu'avec un seul profil d'évolution temporelle à la fois de la population totale, des populations et des richesses des différentes fonctions, mais aussi de leurs orientations synergiques. Pour la population totale, cela se justifie par le fait qu'il s'agit d'une donnée historique connue avec précision et qui n'est pas à considérer comme un paramètre de notre modèle. En revanche pour la répartition de cette population entre les fonctions urbaines, leurs profils de richesse et de synergies, l'estimation, même d'ordres de grandeurs, est un exercice difficile au niveau d'agrégation choisi, et la marge d'erreur lors de l'estimation de chacune de ces valeurs est réelle. Sachant que nous considérons actuellement 11 fonctions et 21 dates, le nombre de valeurs que nous avons gardées constantes pour toutes les simulations, mais potentiellement paramétrables car sujettes à discussion, est de l'ordre de $2 \times (21 \times 11) + (21 \times 11 \times 11)$ soit 3003 valeurs!¹⁸ Ce nombre doit être comparé à celui des variables que nous avons effectivement paramétrées, et du nombre de valeurs différentes que nous avons testé pour chacune.
2. La plupart des instances que nous avons proposées sont déterministes : deux exécutions pro-

¹⁸le premier terme de la somme correspond au nombre de valeurs des matrices des effectifs et des budgets des fonctions urbaines, tandis que le second correspond au nombre des coefficients $pref_{i,k}$ traduisant les synergies de fonction à fonction, pour l'ensemble des 21 pas de temps actuellement simulés.

duiront exactement les mêmes résultats. Cependant d'autres sont stochastiques, et nous devons faire plusieurs exécutions de la simulation sur chaque géométrie (européenne et américaine) pour ensuite regarder la fourchette de sorties générées, et regarder le comportement moyen.

3. Il existe un biais induit par les instances naïves de l'algorithme de localisation. Lorsque nous supposons que l'arbitrage monétaire est inexistant, nous nous retrouvons face à des phénomènes de non-localisation massive des fonctions les moins bien loties (plus de 85% du volume total n'est pas localisé).
4. Nous voulons tester la corrélation entre les deux scores S_{Ordre} et S_{Ecart} : est-ce que les paramétrages qui ont un bon (resp. mauvais) score pour l'un sont également ceux qui obtiennent un bon (resp. mauvais) score pour l'autre ? Si oui, quelle est l'intensité de cette corrélation ? Plusieurs analyses statistiques sont envisageables pour mesurer ces effets (régression logistique ; test du χ^2 entre le score qualitatif et les classes issues d'une classification ascendante hiérarchique ; une analyse de la variance, pour exprimer le quantitatif en fonction du qualitatif)
5. Les nouveaux outils d'exploitation développés, présentés dans le chapitre précédent, n'ont pour l'instant pas été interfacés avec **simpopNano**. Nous devons tirer profit d'entrées-sorties dans des bases de données spatiales, à la fois pour dessiner et travailler sur d'autres géométries de réseaux viaires, mais également pour améliorer la cartographie des sorties du modèle, rudimentaire pour l'instant.

7 Conclusions du chapitre

Nous avons conçu et implanté :

- un modèle de localisation de fonctions urbaines sur le temps-long ;
- un programme le mettant en oeuvre et des outils compagnons permettant de l'exploiter.

Notre découpage en plusieurs modules paramétrables permet de tester facilement des hypothèses concurrentes. L'ajout de nouvelles instances pour chacun de ces modules se fait à un coût de développement supplémentaire faible, même si cet ajout est pour l'instant conditionné à la connaissance des langages C et objective-C, ainsi que de rudiments de Swarm. Les géographes peuvent donc être autonomes dans l'utilisation du logiciel, mais pas dans son évolution.

Nous avons ensuite mené deux expérimentations, l'une avec les seules fonctions non-résidentielles (fonctions de **Simpop2** uniquement), l'autre avec les deux seules fonctions résidentielles. Ces deux expériences ont permis d'isoler des combinaisons d'instances proposées qui permettent de générer des trajectoires simulées de villes spatialement bien différenciées en terme de répartition des densités et des prix entre géométrie européenne et états-unienne. Certains de ces paramétrages incluent une instance de la règle d'accessibilité qui ne tient compte que de la forme des réseaux viaires, et pas des vitesses de déplacement. Cela signifie que sous certaines hypothèses de comportements de localisation (dans tous les cas guidés par l'accessibilité et les synergies non discriminatoires) et des prix (toujours fonction de l'accessibilité), la maille orthogonale est structurellement responsable de motifs de répartitions plus dilués. Mais nous devons relativiser la force des conclusions que l'on pourrait tirer en exhibant ces paramétrages victorieux, car de nombreuses autres combinaisons de ces mêmes instances, tout aussi naïvement vraisemblables, produisent des motifs simulés nettement moins en phase avec l'observé...

De nombreuses données ont de plus été gardées constantes (les coefficients traduisant les orientations synergiques notamment) sans que cela se justifie, et de nombreuses évaluations statistiques doivent être menées sur les bases de données résultats. Nous avons listé quelques pistes

d'analyses à effectuer en priorité, à commencer par celles évaluant le caractère potentiellement redondant des deux principaux scores utilisés pour comparer les développements simulés. Ces constats nous invitent à la modestie quant à la portée des premiers résultats obtenus. Pour les confirmer, il faudrait également que le modèle soit ré-implémenté par des tiers, à partir de la spécification des mécanismes génériques et des instances de règles que nous avons donnés dans ce chapitre. Des exemples passés de répliques de modèles ont en effet montré que les résultats obtenus lors de ces répliques contredisaient ceux obtenus par le modélisateur initial, mettant en évidence des biais dans le passage du modèle conceptuel à l'implémentation [EH03, Bom09].

L'outil développé est en état d'être livré aux géographes pour des expérimentations et des évaluations plus poussées. Le code source est libre et documenté en profondeur. Nous le pensons reprenable par des tiers. L'exploitation du modèle avec les outils présentés dans le chapitre précédent, développés et testés dans un premier temps sur **Simpop2**, mais applicables en l'état à **simpopNano**, doit permettre des gains importants dans l'exploitation, notamment au niveau cartographique et collaboratif (mise à disposition automatisée des rapports d'expériences), mais aussi dans la performance, même si nous avons indiqué que le modèle est très peu gourmand en ressources de calcul.

Enfin nous avons effectué des choix ontologiques originaux pour simuler des dynamiques à ce niveau d'organisation spatiale, en reprenant des entités, les fonctions urbaines, définies a priori pour décrire des dynamiques au plus haut niveau d'organisation territoriale qu'est le système des villes. Ce choix est doublement pertinent :

1. il permet de bénéficier des fruits de la réflexion ontologique et modélisatrice menée par les géographes et réifiée dans **Simpop2** ;
2. il donne un cadre pour tracer des ponts reliant l'inter- et l'intra-urbain, la trajectoire d'une ville au sein du système et son organisation spatiale interne, **Simpop2** et **simpopNano**.

C'est à ce couplage entre ces deux modèles que nous allons nous intéresser dans le dernier chapitre.

Chapitre 6

Eléments d'analyse sur les aspects multi-niveaux dans les simulations à base d'agents¹

1	Des questions en suspens...	187
2	Multi-échelles ou multi-niveaux ?	192
3	Deux exemples de simulation multi-niveaux à la loupe	194
3.1	SIMULBOGOTA : logements et ménages dans la ville de Bogotá	194
3.2	Modèle de migration de cellules cancéreuses	197
4	Simpop3 : simuler les morphogenèses urbaines aux niveaux inter- et intra-urbain simultanément	200
5	Vers des organisations multi-agents multi-niveaux	203
5.1	Multi-modèles	203
5.2	Modèles à spécification multi-niveaux	204
5.3	Modèles multi-niveaux à réification dynamique	205
6	Conclusions du chapitre	205

Il faudrait faire en sorte que tout soit aussi simple que possible, mais pas plus simple.

Albert EINSTEIN

1 Des questions en suspens...

Dans la section 4 du chapitre 3, nous nous sommes demandé si il était possible de concevoir un modèle qui permette de rendre compte de la remarquable inversion de tendance (en termes d'inégalités spatiales) entre les Etats-Unis et l'Europe lorsque l'on se déplace le long de l'échelle

¹Ce chapitre est construit à partir de la structure de [GQHL10] dont il reprend à l'identique des paragraphes dans les sections 2, 3 et 5. La reproduction est faite avec l'accord des co-auteurs.

spatiale². Pris ensemble, il semble que les deux modèles **Simpop2** et **simpopNano** permettent de donner une première réponse à cette question. Nous avons bien, en effet, deux modèles dont l'un a permis, sous certains paramétrages, de simuler des systèmes de villes plus concentrés et hiérarchiques aux Etats-Unis qu'en Europe, tandis que l'autre, également pour certains paramétrages, a permis de simuler des villes plus concentrées en Europe qu'aux Etats-Unis. Mais en exhibant côte à côte ces deux ensembles de paramétrages « victorieux » pour chacun des niveaux, sommes-nous vraiment en train de répondre à la question initiale ? N'est-t-on pas en train de « tricher » ? Et la reproduction de cette inversion avec un modèle intégré, qui couplerait dynamiquement les deux modèles **Simpop2** et **simpopNano** en les rendant inter-dépendants, ne constituerait-elle pas une démonstration plus forte du potentiel explicatif des processus injectés dans chacun de ces modèles ?

Causalités inter-niveaux descendantes... Dans le chapitre 3, nous avons également indiqué que parmi les questions actuelles relatives aux morphogenèses urbaines, certaines concernent justement ces liens d'interdépendance qu'entretiennent les niveaux inter- et intra-urbain. Ces liens existent-ils dans les deux sens ? Nous avons vu dans les chapitres 2 et 3 qu'il existe bien des causalités descendantes, de l'inter vers l'intra-urbain, et nous l'avons acté dans nos modèles, puisque dans **simpopNano**, l'évolution des effectifs des fonctions n'est pas calculée par le modèle mais est une donnée injectée en entrée à chaque pas de temps (<Hyp,Villes,ContraintesSys.>). Ces évolutions des effectifs des fonctions sont en fait exactement ce que calcule **Simpop2** à chaque itération, pour toutes les villes du système. Si l'on doit coupler les deux modèles, on voit donc tout de suite que l'on pourrait substituer aux effectifs donnés en entrée à chaque pas de temps de **simpopNano**, les effectifs de ces mêmes fonctions calculés par **Simpop2** pour la ville en question.

... et ascendantes ? Mais *quid* des causalités ascendantes ? En l'état actuel de **Simpop2**, aucune de ses règles ne tient compte de l'état spatial interne de la ville comme facteur influant sur sa trajectoire au sein du système. La ville y est vue comme une entité atomique spatialement indifférenciée, car **Simpop2** est centré sur le seul niveau inter-urbain, et n'inclut aucune hypothèse intra-urbaine. Pour que le couplage multi-niveaux soit complet, cela impliquerait donc également de modifier **Simpop2** pour intégrer un ou des facteurs supplémentaires liés à la performance spatiale d'une ville, dont on peut faire l'hypothèse qu'elle influe sur son attractivité³, donc sur sa capacité à capter l'innovation, ou bien encore lui confère une réputation préférentielle dans les réseaux d'échanges entre villes.

Soutenabilité urbaine et multi-niveaux. D'un point de vue théorique en géographie, il semble que cette question de l'incidence de la performance spatiale interne d'une ville sur sa trajectoire au sein du système reste largement ouverte. Du fait de l'hétérogénéité des entités et des processus à considérer (par leurs dimensions, par leurs rythmes d'évolution), il est extrêmement difficile d'isoler des données, donc de réfléchir et de proposer des schémas explicatifs, spatiaux, quantitatifs et formalisés de dynamiques multi-niveaux de ce type. La théorie évolutionnaire urbaine par exemple [Pum97] ne mentionne pas cette performance spatiale interne à la ville comme facteur causal de sa trajectoire. Dans la réflexion actuelle sur la soutenabilité des formes urbaines et sur les bonnes pratiques à favoriser (aménagement et politiques incitatives), des outils d'évaluation de l'incidence d'une bonne gouvernance spatiale sur la compétitivité d'une ville

²Rappelons que c'est en Europe que les villes sont spatialement les plus inégalitaires, mais que c'est aux Etats-Unis que le système des villes est plus inégalitaire.

³particulièrement pour les cycles d'innovation à venir, probablement porteurs d'une ingénierie « verte » et donc concernés par ces considérations de soutenabilité environnementale

deviennent pourtant cruciaux. Là encore, la simulation peut permettre de mettre en balance des propositions théoriques innovantes cherchant à lier théorie évolutionnaire urbaine et théories de la localisation.

Autonomie et viabilité des niveaux. Des questions comme celle qui nous motive requièrent l'intégration, la spécification et l'articulation de connaissance à de multiples niveaux d'organisation dans les modèles, car les schémas explicatifs spécifiant de la connaissance à un niveau seulement (micro ou macro) échouent à y répondre. Cette « posture multi-niveaux » est probablement acceptable à des degrés différents suivant les disciplines. Nous sommes tentés de penser qu'en sciences sociales, il est plus facile de parler de niveaux d'organisation multiples possédant une véritable *autonomie*, et d'invoquer des influences ascendantes comme descendantes, simultanément, pour expliquer un processus complexe. Dans d'autres disciplines, en biologie par exemple, la question de l'autonomie des niveaux d'organisation fait encore largement débat. Pour montrer qu'il existe une autonomie de la structure par rapport à l'entité, il ne suffit pas de montrer qu'il existe des rétroactions du niveau supérieur sur le niveau inférieur. Cette influence ne démontre pas en effet la *persistance* du niveau du haut. Il faut montrer qu'il est plus que la simple conséquence de « ce qui se passe » au niveau inférieur. En sciences sociales, il est sûrement plus facile d'assumer cette posture multi-niveaux, parce que des groupes d'individus ont établi des institutions collectives dont certaines affirment très explicitement leurs intentions et leurs règles qui s'imposent aux individus (donnons l'exemple du droit, de la puissance publique, etc.). Mais plutôt que de parler d'autonomie, nous préférons parler de *viabilité* : dès l'instant que « cela fonctionne » et que « cela dure », c'est la preuve qu'il y a bien des processus qui font tenir le tout ensemble.

Motivations supplémentaires au multi-niveaux. Au-delà de ces considérations disciplinaires, Servat et ses collègues nous rappellent que cet exercice est plus généralement un fondamental de la gymnastique intellectuelle scientifique : faire cohabiter des points de vue et des descriptions complémentaires sur un même système [SPTD98]. Ces auteurs pointent deux raisons supplémentaires qui peuvent motiver la prise en compte de niveaux d'organisation multiples :

1. *la performance* : beaucoup de systèmes décentralisés font preuve d'un comportement global qui devient remarquable lorsque le nombre de composantes interagissant devient critique-ment grand. Mais d'un point de vue computationnel, cela peut être très coûteux de simuler de tels systèmes. Nous avons vu dans le chapitre 2 (section 4.1.3) que sous certaines conditions, des optimisations calculatoires, sans incidence sur la correction du calcul peuvent permettre un gain du temps de calcul. Dans cette optique, substituer des « super-agents » à des groupes d'agents et leur associer un modèle comportemental agrégé et moins coûteux, mais qui en constitue une approximation acceptable, permet donc de gagner en performance, et également de transposer les ressources ainsi économisées pour modéliser plus finement d'autres parties du système.
2. *la prise en compte de comportements enrichis* : la prise de conscience de sa similarité avec d'autres agents et de l'existence d'une structure « groupe » les rassemblant peut entraîner chez l'agent une modification intentionnelle de son comportement, soit pour renforcer son appartenance au groupe, soit pour s'en distinguer. Plus généralement, le fait de pouvoir prendre en compte simultanément plusieurs niveaux d'organisation dans un même modèle doit permettre d'aborder des questions originales.

Mais comme le souligne A. Lesne dans [Les09], « il ne s'agit pas tant de prendre en considération tous les éléments et leurs relations que de considérer *simultanément* le niveau des éléments

et ceux de leurs propriétés émergentes et la façon dont ils sont couplés ». Pour le formuler autrement, c'est donc plus dans l'*articulation* de différents niveaux d'organisation que dans leur seule juxtaposition que se situe l'apport d'un modèle multi-niveaux. Articuler les niveaux, cela implique de les prendre en compte explicitement dans le modèle et de définir la manière dont ils sont couplés, ce qui se traduira dans un modèle à base d'agents par l'interaction, et donc l'interdépendance, entre agents/objets de niveaux différents. Cette question de l'articulation de dynamiques collectives multiples est très actuelle en simulation multi-agents. J.-P. Treuil et ses collègues la présentent comme l'un des « chantiers » du domaine en conclusion de leur livre [TDZ08], et des projets actuels visent à construire des plates-formes de simulation devant faciliter la prise en compte simultanée de plusieurs niveaux (par exemple MAGEO [Lan09] en géographie, ou 3WORLDS [GDH05] en écologie).

Approche classique du multi-niveaux dans la simulation à base d'agents. On pourra s'étonner de ce que l'on insiste sur le besoin de multi-niveaux en simulation à base d'agents, alors même que celle-ci a justement été plébiscitée notamment pour sa capacité à articuler dynamiques collectives donnant lieu à des phénomènes émergents (*bottom-up*) et leurs rétroactions sur les entités (*top-down*). En fait, l'aspect « multi-niveaux » d'une modélisation à base d'agents correspond le plus souvent, et comme pour d'autres approches de calcul, au choix d'un niveau particulier d'organisation auquel l'on va décrire les entités et leurs interactions, et à l'observation de structures émergentes de plus haut niveau. Les motifs d'organisation apparaissant au niveau macro conditionnent en retour dynamiquement les trajectoires des agents. Deux phrases nous semblent bien résumer cet usage des SMA qui a été majoritaire en simulation sociale et géographique jusqu'à présent :

In biological and ethological sciences first, and then in human and social sciences, MAS have shown their applicability to relate the micro level, where entities can be found and where individuals behaviours take place, to the macro-level which results from the interaction of these entities. [Fer07]

et

[La simulation multi-agents est utilisée lorsque] la problématique amène à s'intéresser à un phénomène collectif et qu'on suppose que celui-ci émerge et évolue en fonction d'interactions opérant au niveau élémentaire [San07].

Le choix du niveau micro (de description) conditionne la sélection des entités du système réel qui sont réifiées sous forme d'agents dans le modèle. De la connaissance complémentaire (sur le contexte, historique ou économique par exemple) peut être ajoutée, souvent via l'*environnement*, qui est une entité à part entière et qui peut avoir des usages multiples [TDZ08]. Le système simulé peut alors être *analysé et mesuré à au moins deux niveaux d'organisation* :

1. celui des agents d'une part, via une analyse de l'évolution de leur état (leur trajectoire) ;
2. celui du système d'autre part, via des mesures permettant de caractériser dynamiquement ses propriétés et/ou les structures produites au cours de la simulation.

Le système peut aussi être mesuré à de multiples niveaux intermédiaires (mésos) qui peuvent faire sens pour le modélisateur, correspondant par exemple à des *groupes* d'agents partageant des propriétés communes. Nous avons par exemple vu des analyses associées à de multiples niveaux méso dans le cas d'Eurosim [SM08] (cf. chapitre 4 section 6). Mais en pratique, ce raffinement est plus rarement mis en place dans les modèles de la littérature que nous avons présentés.

Multi-niveaux faible et fort. Pour ces modèles de sociétés d'agents donnant lieu à des dynamiques collectives micro→macro et à des rétroactions macro→micro⁴, seul le niveau « du bas » (micro) est donc spécifié par le modélisateur comme une société d'agents. Le ou les niveaux supérieurs sont dans ce cas des niveaux qui peuvent être observés et mesurés pendant les simulations mais :

- soit ils ne sont pas réifiés en tant que tels dans le modèle ;
- soit ils sont réifiés, mais de façon plus agrégée, souvent via l'*environnement*, par exemple avec des équations différentielles calculant l'évolution de variables contextuelles venant contraindre l'évolution de la population d'entités.

Ce dernier cas de figure nous semble également être celui d'autres approches de modélisation (microsimulation, AC constraints, synergetique [GT05b, San92]) permettant certes d'articuler plusieurs niveaux d'organisation, mais où un seul de ces niveaux peut être spécifié et simulé comme une population d'entités spatialisées et interagissantes. Il nous semble dans ce cas que qualifier ces modèles à base d'agents (et ces autres approches) de *multi-niveaux* implique une acceptation faible de ce que devrait être la propriété *multi-niveaux* d'un modèle. On préférerait garder cette dénomination pour les modèles qui peuvent intégrer un nombre *a priori* arbitraire de niveaux (potentiellement plus que deux, micro et macro) et où chacun serait représenté avec un degré de désagrégation laissé libre au modélisateur. Elle est aussi source de confusion, car alors quel terme employer pour qualifier des approches plus ambitieuses qui tâcheraient d'articuler de multiples sociétés d'agents interagissantes et spatialisés, et situées à différents niveaux d'organisation spatiale ?

Niveaux et méta-modèles d'organisations multi-agents. En tout cas, cette approche mono-niveau dans la conception d'un collectif d'entités interagissantes, et bi-niveaux dans l'analyse des comportements produits par la dynamique collective, est de loin la plus courante actuellement en simulation spatiale à base d'agents (voir par exemple les modèles présentés dans [TDZ08, BT04, Bat05, BP09]). Pourtant les méta-modèles organisationnels de sociétés d'agents ont été dès les débuts des SMA un de leurs axes d'étude privilégiés. Ces organisations génériques ne contraignent pas à exprimer les phénomènes collectifs en termes bi-niveaux, micro-macro (cf. les méta-modèles successifs de J. Ferber : [Fer95] chapitre 3, AGR [GF98, FGM04], quatre quadrants [Fer09], ou travaux apparentés [CDP96]), mais ouvrent au contraire la porte à une multitude de niveaux interdépendants, chacun exprimé comme un SMA. Il s'agit de proposer des architectures où le lien individu↔collectif, composé↔composant est un motif élémentaire récursivement reproductible [MBLA96, OD97].

Ré-écriture d'agents et de SMA. Envisagé dynamiquement, l'idée serait d'écrire des règles de ré-écriture d'agents dans des SMA pour, statiquement ou dynamiquement, substituer un collectif d'agents à un agent isolé (gain de précision, cf. section 4), et réciproquement (gain de performance, cf. section 3.2), ou encore substituer un collectif d'agents de granularité supérieure à un autre collectif d'agents de granularité plus fine (gain par baisse de complexité, cf. section 3.1). La structure et le comportement des agents qui viennent se substituer dynamiquement à d'autres agents, peuvent être spécifiés par le programmeur, ou bien, avec un niveau d'indirection supplémentaire, observés et appris par le programme. En somme, nous allons voir dans les sections suivantes que les possibilités d'un multi-niveaux enrichi dans la simulation multi-agents sont réelles. Le problème n'est pas tant un problème de techniques de calcul (même si celles-ci

⁴rentrent aussi dans ce cadre les exemples classiques (colonies de fourmis, trafic routier, nuées d'oiseaux, ségrégation spatiale) ayant popularisé la simulation multi-agent

sont tout à fait cruciales pour l'expressivité et la performance de la simulation) qu'un problème d'ontologies, à négocier avec l'expert [PL09]. Avant d'aller plus en avant, parce que le multi-niveaux recouvre également le couplage de modèles, nous devons délimiter un problème non-traité par les propositions multi-niveaux qui suivront.

Modèles concurrents et apprentissage statistique. Un cas difficile, non étudié ici, est celui de plusieurs modèles partageant des objets communs dont ils peuvent modifier un même ensemble de variables. Dans le cas où deux modèles calculent l'évolution d'une même variable, des problèmes de cohérence peuvent se poser. Prenons l'exemple de la population P_i^t d'une ville i à l'instant t qui serait calculée comme :

1. une fonction f , qui agrège les populations de ses quartiers ;
2. une fonction g de la population de la ville i et des populations des autres villes à $t - 1$.

Si f et g s'appuient sur des variables explicatives distinctes, et les deux populations P_i^f et P_i^g calculées par f et g sont différentes. Comment négocier leur couplage ? Plusieurs pistes statistiques existent pour ce genre de problème. On peut voir cela comme un problème d'apprentissage : on doit alors trouver une fonction $H(f, g)$ qui synthétise les deux séries P^f et P^g par ajustement aux données. On peut essayer d'ajuster dynamiquement le paramétrage de chacune (en supposant que f et g soient des fonctions paramétrées), ou bien faire du filtrage : on mesure leur performance en temps-réel (en les comparant aux données disponibles), et on ajuste dynamiquement les paramètres de H pour tenir compte plutôt de f ou plutôt de g , selon leurs évaluations [Sap06].

Plan du chapitre. Nous tentons dans la section 2 un travail de définition indispensable pour démêler et affiner les notions manipulées. Dans la section 3, nous regardons à la loupe deux modèles multi-niveaux, l'un issu de la géographie urbaine et l'autre de la biologie cellulaire, pour lesquels nous explicitons les différents niveaux du modèle ainsi que les mécanismes assurant leur couplage. La section 4 est dédiée à la présentation du modèle de conception **Simpop3**, et à la façon dont il met en oeuvre des systèmes multi-agents imbriqués (un agent d'un SMA est lui-même un SMA) pour articuler des dynamiques collectives et spatialisées à de multiples niveaux d'organisation territoriale. Ces trois modèles nous montrent que la volonté d'articulation multi-niveaux peut poursuivre des objectifs variés. Nous proposons ensuite une abstraction des organisations multi-agents sous-jacentes à ces trois modèles pour mettre en lumière leurs différences et discuter des conditions de leur déploiement. Ceci se concrétise dans la section 5 par une classification de différents types d'approches multi-niveaux exprimées à l'aide d'agents.

2 Multi-échelles ou multi-niveaux ?

Échelle ou niveau, multi-échelles ou multi-niveaux ? Les deux mots d'échelle et de niveau sont fréquemment utilisés pour décrire les systèmes complexes et caractériser les abstractions manipulées, leur granularité et leur position dans des hiérarchies. Les deux termes sont fréquemment utilisés de manière interchangeable en simulation, qui plus est de manière différente en fonction des disciplines, ce qui est source de confusion. Il convient donc de s'arrêter un instant sur les notions recouvertes par ces deux mots, mais aussi sur celles de *hiérarchie* [Pum06a] et de *structure*. Nous nous référerons largement, pour cela, au travail effectué par Gibson et ses collègues dans [GOA00].

Échelles et niveaux

La notion d'*échelle* est fréquemment précisée par un qualificatif la rapportant à l'espace ou au temps : échelle spatiale, échelle temporelle. Tout au long du manuscrit, nous avons employé le terme *niveau* en lui associant des qualificatifs tels que *micro*, *macro* ou *méso* situant l'entité ou le processus décrit de façon relative dans le système, en liaison avec sa taille, son temps d'évolution caractéristique ou un rapport d'inclusion avec d'autres sous-systèmes. En première approche, nous considérerons ainsi que la notion d'*échelle* se rapporte à une dimension d'analyse selon laquelle le phénomène d'intérêt pourra être mesuré. Cette dimension peut être spatiale ou temporelle, mais également quantitative. Les dimensions spatiale et temporelle se réfèrent respectivement aux dimensions physiques des entités impliquées dans le phénomène (typiquement en géographique du décamètre au millier de kilomètres en passant par toutes les tailles intermédiaires), et au temps caractéristique associé aux comportements de ces entités et à leurs interactions (de l'heure⁵ au siècle⁶). La dimension quantitative se réfère quant à elle au nombre d'entités impliquées dans le phénomène (typiquement de 2 à quelques milliards).

Par rapport à cette notion d'échelle, on pourrait en première approximation assimiler le *niveau* à un barreau d'échelle, permettant de situer le processus étudié et les entités qui y participent le long de la dimension d'analyse. Mais par extension, un niveau désigne aussi un ensemble d'entités et de processus dont les dimensions spatiales et les temporalités sont de mêmes ordres de grandeur, constituant des structures (« niveau de la ville », « niveau régional », etc.). Si l'on s'en tient à cette définition des notions d'échelle et de niveau, il ne faudrait donc pas, en toute rigueur, parler de modèles multi-échelles, mais bien plutôt de *modèles multi-niveaux*. Il s'agit en effet, la plupart du temps, de signifier que les entités du modèle se situent et agissent à des niveaux différents le long des deux échelles spatiale et temporelle.

Nous l'avons déjà indiqué dans le chapitre 2, mais il faut bien noter que la notion de niveau est à la fois *relative* et liée à un choix de modélisation. Par *relative*, nous entendons qu'une entité considérée pour la description d'un phénomène ne peut être décrite de manière absolue comme étant de niveau micro, méso ou macro. Du point de vue de la biologie moléculaire par exemple, les molécules sont associées au niveau micro tandis que la cellule est associée au niveau macro, tandis que du point de vue de la physiologie, les cellules sont au contraire associées au niveau micro, le niveau macro correspondant au tissu. Par ailleurs, le fait d'associer une entité à un niveau n'est pas uniquement lié à ses caractéristiques intrinsèques mais constitue le résultat d'un choix de modélisation. Le choix d'associer différentes entités au sein d'un niveau fait en effet souvent intervenir le fait que les entités appartiennent à une structure ou à une organisation pertinente du point de vue de la question étudiée à l'aide du modèle. Il est d'ailleurs fréquent de parler de « niveau d'organisation » ou de « niveau d'abstraction » [MP01].

Hiérarchies et structures

On voit apparaître deux nouvelles notions qui sont celles de *hiérarchie* et de *structure* :

- hiérarchie, car les systèmes sont souvent décrits sous la forme d'un emboîtement hiérarchique de niveaux (bâtiment, rue, quartier, ville, pays ; individus, groupe, institution)
- structure, car c'est souvent la reconnaissance de la structuration d'un ensemble d'entités à un niveau donné qui permet la définition d'entités à un niveau supérieur.

[GOA00] présentent la *hiérarchie* comme « un système de regroupement d'objets ou de processus liés conceptuellement ou causalement le long d'une échelle analytique », et distinguent

⁵par exemple les questions liées aux mobilités domicile-travail

⁶typiquement les questions qui nous intéressent

trois types de hiérarchies : exclusives, inclusives ou constitutives. Une *hiérarchie exclusive* est une hiérarchie dans laquelle il n'y a pas de lien d'inclusion entre les entités d'un niveau et les entités du niveau supérieur. C'est le cas par exemple des hiérarchies de commandement militaire ou encore des chaînes trophiques. Dans les hiérarchies de types inclusive ou constitutive au contraire, les entités d'un niveau donné sont incluses dans une entité de niveau supérieur. Dans le cas des *hiérarchies inclusives*, il s'agit d'une relation catégorielle, à la manière des hiérarchies de classes dans un langage de programmation par objets (arbre d'héritage où les classes filles possèdent toutes les propriétés des classes mères) ou bien des hiérarchies de catégories taxonomiques (domaine, règne, embranchement, classe, ordre, famille, genre, espèce). Dans le cas des *hiérarchies constitutives*, les entités d'un niveau sont regroupées en nouvelles entités organisées au niveau immédiatement supérieur, ces dernières étant caractérisées par de nouvelles fonctions et propriétés émergentes (molécules, cellules, tissus, organes, individus).

3 De la « cellule urbaine » à la cellule biologique : deux exemples de simulation multi-niveaux

Le contexte précisé, nous nous attardons sur deux projets de simulation à base d'agents dans lesquels la question du multi-niveaux a été abordée explicitement. Le premier est SIMULBOGOTA, que nous avons déjà mentionné dans la section du chapitre 2 présentant des modèles à base d'agents. Il traite des choix de logement des ménages dans la ville de Bogotá, traités au niveau des ménages et des logements eux-mêmes mais également à un niveau original de *groupes* de logements et de ménages. Le second exemple est issu de la biologie et concerne la croissance d'une tumeur cancéreuse, abordée aux niveaux moléculaire et cellulaire.

Nous ne présentons pas ici ces modèles pour leurs résultats, mais uniquement pour la manière dont ils mettent en oeuvre la notion de simulation multi-niveaux. Pour ce faire, et afin de faciliter la comparaison entre ces deux modèles et notre propre approche du multi-niveaux présentée dans la section suivante, nous répondrons en particulier aux questions suivantes :

1. *Spécification des niveaux* : quels sont les différents niveaux identifiés, quels sont les types d'objets et/ou d'agents définis à chacun de ces niveaux, et comment ces types sont-ils définis (sont-ils spécifiés *a priori* ou bien sont-ils découverts de manière dynamique ?) ;
2. *Instanciation des objets* : comment l'instanciation des objets et/ou agents est-elle effectuée (celle-ci s'effectue-t-elle de manière statique en créant explicitement les agents du modèle, ou bien ceux-ci sont-ils créés de manière dynamique pendant la simulation en fonction du contexte ?) ;
3. *Couplage entre les niveaux* : de quelle manière les différents niveaux sont-ils couplés (comment interagissent les agents de niveaux différents ?).

3.1 SimulBogota : logements et ménages dans la ville de Bogotá

Contexte et objectif

L'objectif du modèle SIMULBOGOTA [GQ07, GQPD07a] est de modéliser l'évolution de la distribution spatiale de la population de la ville de Bogotá sur plusieurs décennies. Cette évolution dépend principalement des migrations à l'intérieur et à l'extérieur de la ville ainsi que de l'évolution de la population de ménages et du parc de logements. L'évolution de la population de ménages est le résultat d'événements individuels (mariage, divorce, émancipation, mort, etc.) qui produisent des changements socio-économiques dans les ménages existants, ainsi que

la création et la disparition de ménages. L'évolution du parc de logements dépend principalement du renouvellement et du vieillissement du bâti. Dans le cas de Bogotá, ces processus sont le résultat de dynamiques complexes qui font intervenir la construction contrôlée par les politiques d'aménagement, mais également des mécanismes informels comme l'auto-construction et le lotissement illégal.

Modèle

Pour la réalisation de ce modèle, les auteurs disposent uniquement de descriptions socio-économiques des ménages et des logements ainsi que de leur distribution spatiale pour les années 1973 et 1993. En l'absence de données suffisantes, une modélisation centrée sur une représentation explicite de mécanismes individuels de décision et d'évolution s'avère inadéquate voire impossible. Dans ces conditions, le parti pris adopté est de considérer des *groupes de ménages* et des *groupes de logements* comme entités principales de modélisation. Il s'agit de réduire la complexité des simulations par la prise en compte d'un niveau agrégé et d'y placer le processus de décision conduisant les ménages à déménager. Toutefois, il est nécessaire de considérer les populations de ménages et de logements afin de pouvoir modéliser l'évolution de ces groupes.

Dans ce modèle sont considérés de manière explicite deux niveaux de modélisation : le *niveau microscopique* qui correspond aux données qui décrivent la population de ménages et le parc de logements, et le *niveau mésoscopique* qui correspond aux groupes de ménages et aux groupes de logements. Le modèle est composé essentiellement de trois mécanismes exécutés en séquence à chaque pas de simulation :

1. *formation de groupes* : cela permet de passer du niveau microscopique (ménages et logements) au niveau mésoscopique (groupes de ménages et groupes de logements). Il s'agit d'un mécanisme de classification automatique [GQP07] effectué sur les données qui représentent les ménages et les logements ;
2. *interaction entre groupes* : cela permet de relocaliser les ménages dans l'espace. Il s'agit d'un mécanisme basé sur des enchères qui permet l'échange de logements entre groupes de ménages. Ces interactions sont régies par des listes de préférences de logements construites dynamiquement⁷ et par une matrice statique de coûts de déménagement entre secteurs urbains. Dans ce mécanisme, les auteurs font l'hypothèse que les ménages cherchent à se rapprocher des ménages de leur groupe social et à occuper les mêmes groupes de logements. Il s'agit donc d'un mécanisme de ségrégation spatiale auto-renforcé ;
3. *évolution de la population* : il s'agit d'un mécanisme basé sur l'exécution de règles globales d'évolution de la population de ménages et de logements. Ces règles permettent la création ou la suppression d'entités au niveau microscopique (ménages et logements). Chaque règle associe un profil d'entité avec un nombre d'entités à traiter. Ces règles représentent des tendances globales d'évolution des effectifs, et non pas des événements individuels très difficiles à prendre en compte et très gourmands en données.

Pour pouvoir tracer l'évolution des groupes, un dernier mécanisme permet de mettre en relation les groupes trouvés au cours de deux pas de simulation successifs.

Agents et niveaux

Dans ce modèle a été introduit un niveau intermédiaire composé de structures « *artificielles* » : des groupes formés d'entités microscopiques semblables. Il s'agit de structures qui n'ont pas d'équivalent physique et qui résultent de l'analyse des données de ménages et de logements. Il

⁷Les préférences dépendent de la distribution spatiale instantanée des ménages, cf. [GQPD07a].

Il y a donc coexistence d'entités physiques au niveau micro avec des entités artificielles au niveau méso réifiées dynamiquement par classification des entités du niveau micro en groupes homogènes (voir figure 6.1). Par rapport aux modèles de phénomènes physiques, la question supplémentaire du niveau d'abstraction se pose : il s'agit de définir le nombre de groupes à considérer, sachant qu'un nombre réduit peut produire une sur-simplification du modèle, tandis qu'un nombre élevé peut rapprocher excessivement les groupes du niveau microscopique et entraîner la perte de leur capacité de synthèse. Même si le niveau des groupes a été *spécifié au préalable*, le nombre des groupes considérés est déterminé à l'exécution et les groupes eux-mêmes sont *instanciés dynamiquement* à partir de la classification des données de ménages et logements à chaque pas de simulation.

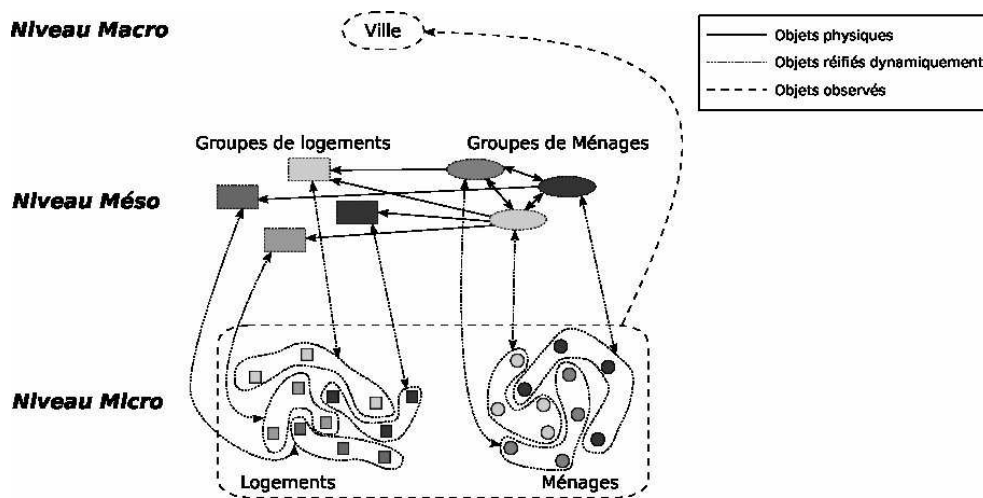


FIG. 6.1 – Diagramme des interactions entre niveaux dans la simulation de l'évolution de la distribution spatiale de la population dans SIMULBOGOTA ; Les flèches entre le niveau micro et le niveau méso correspondent aux processus de classification des ménages et logements en groupes de ménages et groupes de logements (dans le sens ascendant) et aux processus de relocalisation des ménages (dans le sens descendant)

Du point de vue de l'évolution, des règles générales ont été construites à partir des données descriptives des ménages et des logements. Le moteur d'évolution est donc placé au niveau microscopique et ses effets sont propagés aux groupes par le mécanisme de passage entre le niveau microscopique et celui des groupes (couplage ascendant). En revanche, il n'existe pas d'interaction directe entre entités microscopiques, les entités *actives* du système étant donc les groupes. Le niveau microscopique fait office de *point d'ancrage avec la réalité* tandis que le niveau des groupes offre *une vision synthétique de la réalité*, ce qui facilite la formulation et l'évaluation d'hypothèses sur le comportement du système permettant donc de mieux comprendre le phénomène modélisé.

Le caractère « artificiel » des groupes conditionne la mise en place de mécanismes d'interaction *ad-hoc* entre groupes et des mécanismes d'interaction inter-niveaux. Contrairement à la modélisation d'entités « physiques », dans ce cas-là, et en l'absence de règles de comportements de groupe bien établies ou facilement déductibles, le modélisateur est en effet *libre* dans la définition de mécanismes d'interaction. Ceci d'autant plus que l'on connaît très peu sur le fonctionnement des groupes, ce qui implique que le mécanisme choisi pour représenter l'interaction entre les groupes est aussi artificiel que les groupes eux-mêmes. Le mécanisme proposé, basé sur les enchères de logement, n'a pas de fondement réel. Il s'agit d'un artefact qui permet

l'appariement dynamique et multi-critères entre groupes de ménages et groupes de logements. Ce mécanisme, dont le choix ne relève que de l'intuition des modélisateurs, permet de relocaliser les ménages, et ainsi d'assurer le couplage descendant entre le niveau des groupes et le niveau microscopique.

3.2 Modèle de migration de cellules cancéreuses

Notre second exemple est emprunté à la biologie cellulaire, et nous emmène bien loin des problématiques géographiques auxquelles notre travail est appliqué. Nous le présentons parce qu'il a été réalisé au sein de notre équipe de recherche (LIS) et qu'il s'est inscrit dans le travail de comparaison d'approches multi-agents et multi-niveaux dont nous proposons une synthèse dans la section 5. Il nous offre un très bon exemple d'une autre motivation à la prise en compte explicite de plusieurs niveaux : celle du passage dynamique (pendant la simulation) d'un modèle entité-centré à un modèle agrégé, dans une optique de gain de performance qui permet soit de simuler de plus gros systèmes, soit de simuler plus finement d'autres parties du système. Cette motivation peut tout aussi bien être celle d'une application en géographie, et cela nous a donc paru pertinent de la décrire dans ce chapitre.

Contexte et objectif

En matière de cancer, l'un des facteurs de mauvais pronostic est lié à l'apparition de métastases, c'est-à-dire de tumeurs secondaires. Les auteurs de ce modèle s'intéressent aux conditions micro-environnementales, autour d'une tumeur cancéreuse, pouvant conduire à l'échappement métastatique d'une cellule tumorale [LH09]. En particulier, le but est d'étudier l'impact de la molécule PAI-1 (une protéine), suspectée d'être à l'origine de la transformation morphologique des cellules permettant l'échappement [MGM⁺06]. Cette molécule est produite par les cellules elles-mêmes et peut se fixer sur la matrice extra-cellulaire. Les cellules disposent de récepteurs pour fixer puis internaliser PAI-1. Lorsque cette dernière est accrochée à la matrice extra-cellulaire, présente tout autour de la tumeur, elle fournit alors aux cellules des points d'adhésion qui leur permettent de migrer à travers la matrice.

Modèle

Le modèle développé intègre, de manière individuelle, aussi bien les cellules cancéreuses que les molécules de PAI-1. La modélisation de la croissance de la tumeur est obtenue par un comportement de division cellulaire : une cellule peut se diviser pour donner deux cellules filles au bout d'un temps variable qui dépend de son accès aux nutriments. Ce comportement prolifératoire est couplé à un comportement de répulsion entre cellules : deux cellules trop proches se repoussent. Le modèle intègre par ailleurs la dynamique de production et d'internalisation de PAI-1 par les cellules. Une cellule produit des molécules de PAI-1 avec un certain taux. Dans le même temps, elle peut internaliser le PAI-1 en suspension, ainsi que le PAI-1 matriciel, avec une probabilité directement proportionnelle à son nombre de récepteurs. L'accès aux nutriments définit trois états différenciés pour les cellules de la tumeur :

1. une cellule de la couche externe de la tumeur, ayant un accès satisfaisant aux nutriments, est active et possède à la fois les deux comportements de prolifération et production/internalisation de PAI-1 ;
2. une cellule de la couche interne de la tumeur, ayant un accès insuffisant aux nutriments, nécrose et meurt ;

3. les cellules de la couche intermédiaire reçoivent quant à elles suffisamment de nutriments pour produire et internaliser PAI-1 mais plus suffisamment pour proliférer ; elles sont qualifiées de quiescentes.

Lorsque les tumeurs simulées atteignent des tailles de quelques milliers de cellules, il faut alors gérer plusieurs centaines de milliers de molécules de PAI-1. On se trouve ainsi rapidement limités par la taille des tumeurs que l'on peut simuler de façon entité-centrée. La solution proposée par les auteurs consiste à abstraire certains détails du modèle dans les zones où ils ne sont pas utiles, ce qui permet au choix de simuler des tumeurs plus grandes, ou d'ajouter des détails dans les zones d'intérêt. La zone d'intérêt principal se situant à l'interface entre la couche externe de la tumeur et la matrice extra-cellulaire, les auteurs ont donc proposé de remplacer les couches internes de la tumeur par un modèle agrégé, constitué à la fois de cellules et de molécules de PAI-1. Le cœur de la tumeur et son modèle à base d'agents sont ainsi abstraits par un modèle global de calcul de flux entrant et sortant. Du point de vue spatial, ce modèle est délimité par l'ensemble des cellules nécrosées ou quiescentes, à l'exception d'une couche de cellules quiescentes qui constitue la bordure du modèle agrégé. Ces cellules étant immobiles ou très peu mobiles, cela permet de s'abstraire des mouvements de répulsion entre cellules, ceux-ci étant principalement dus au comportement de division cellulaire dans la couche de cellules actives. Le modèle agrégé intègre toutes les cellules ainsi que toutes les molécules de PAI-1 situées dans le périmètre ainsi défini. Il s'agit alors de calculer les interactions entre ce modèle agrégé et les cellules ou molécules situées à l'extérieur. Il est relativement aisé de déterminer les cellules et molécules qui devront être intégrées au modèle agrégé : dans le cas des cellules, il s'agit d'examiner lesquelles sont quiescentes et entièrement entourées d'autres cellules quiescentes ; concernant les molécules, il suffit d'examiner lesquelles, dans leur mouvement de diffusion aléatoire, vont percuter la frontière du modèle agrégé. Pour déterminer combien de molécules seront au contraire « relâchées » par ce modèle agrégé, il est nécessaire d'évaluer la proportion de cellules nécrosées par rapport aux cellules quiescentes, afin de déterminer le nombre de cellules produisant ou internalisant ces molécules. Il est ensuite aisé de mettre à jour la quantité de molécules de PAI-1 à l'intérieur du modèle agrégé, en considérant que l'activité d'internalisation et d'externalisation de ce modèle agrégé est directement proportionnelle à la quantité de cellules quiescentes qu'il contient. En assimilant les molécules diffusant à l'intérieur du modèle agrégé à un gaz, on peut alors calculer la « pression » à l'intérieur du modèle agrégé, et donc déterminer la quantité statistique de molécules de PAI-1 devant quitter ce modèle agrégé. Celles-ci sont alors distribuées aléatoirement à l'extérieur du modèle agrégé, au voisinage immédiat de la frontière.

Agents et niveaux

Dans ce modèle coexistent des entités de tailles très différentes, des cellules d'une part, des molécules d'autre part. Les niveaux correspondent dans ce cas (voir figure 6.2) à ces deux types d'entités, lesquelles sont définies *a priori*. L'instanciation s'effectue en créant une cellule initiale, qui elle-même crée d'autres cellules par divisions successives, et produit et externalise des molécules. Les niveaux cellulaire et moléculaire sont couplés du fait de l'activité des cellules, qui produisent et internalisent des molécules de PAI-1. L'ensemble produit par la simulation, à un niveau d'organisation supérieur, un amas de cellules que l'on observe et que l'on désigne sous le nom de tumeur. Il n'y a pas jusque là de passage explicite de niveau mais seulement l'interaction, dans un environnement commun, entre entités de niveaux différents sur l'échelle spatiale. Le niveau de la tumeur est quant à lui seulement observé et n'a aucun rôle en tant que tel dans la simulation.

A contrario, lorsque le modèle agrégé est dynamiquement introduit (voir figure 6.3), on identifie en cours de simulation une entité de niveau intermédiaire entre le niveau des cellules

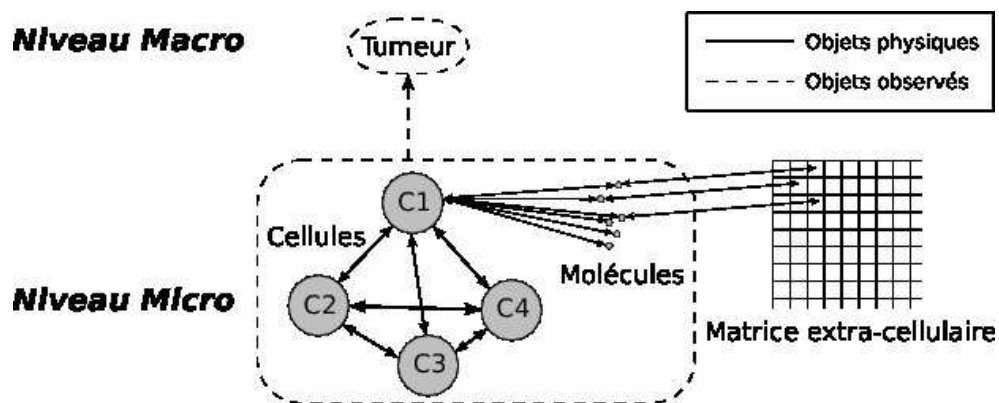


FIG. 6.2 – Modélisation d'une tumeur à partir d'entités cellules et molécules

et le niveau de la tumeur qui est réifiée en tant que telle. Il y a donc l'introduction d'un niveau supplémentaire de modélisation, celui d'un tissu multicellulaire correspondant au coeur de la tumeur. Ce type d'objet est spécifié *a priori* : on sait de manière certaine que la simulation du modèle va conduire au développement d'une tumeur et l'on peut donc anticiper l'apparition de cet objet. Son instantiation en revanche dépendra du moment où un tel type d'objet pourra être observé dans la simulation. Concernant le couplage avec les cellules et les molécules, il s'effectue différemment selon que ces dernières sont internes ou externes à ce modèle agrégé. Le couplage avec les cellules et molécules internes est réalisé grâce à un système d'équations différentielles très simples, décrivant l'évolution des quantités de cellules respectivement nécrosées et quiescentes, l'évolution de la quantité de molécules à l'intérieur du modèle, ou encore la quantité de molécules externalisée. Le couplage avec les cellules et molécules externes est réalisé en décrivant les conditions dans lesquelles ces dernières doivent être intégrées au modèle agrégé, et les règles liées à l'externalisation de molécules.

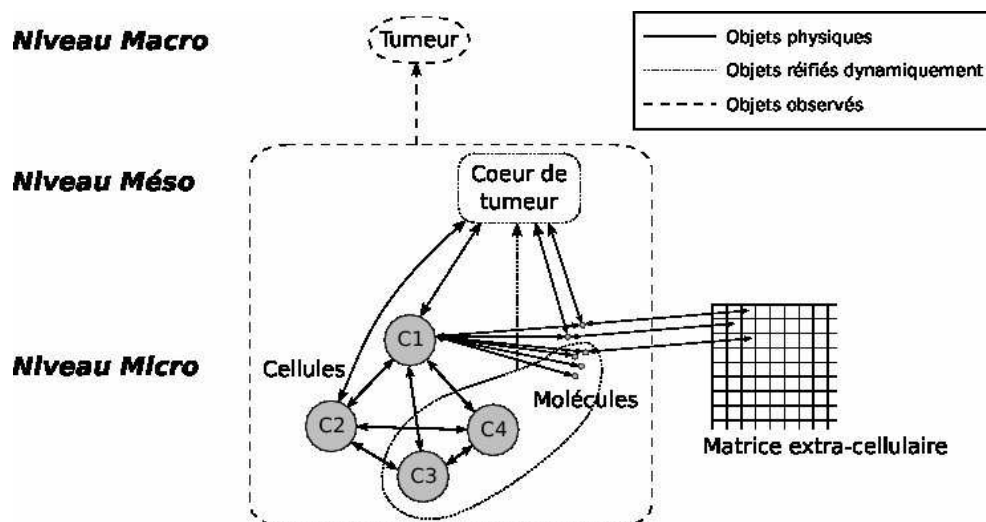


FIG. 6.3 – Introduction d'un modèle agrégé pour le coeur de la tumeur

4 Simpop3 : simuler les morphogénèses urbaines aux niveaux inter- et intra-urbain simultanément

Contexte et objectifs

Avec Simpop3, l'objectif est de coupler les deux modèles Simpop2 et *simpopNano*, présentés dans les chapitre précédents, en un modèle multi-agents et multi-niveaux (au sens fort proposé dans la section 1). En articulant quartiers, villes, et système des villes, le modèle sert à tester des heuristiques sur la nature des inter-influences qu'entretiennent ces niveaux d'organisation du peuplement. Dans le cadre de notre comparaison Europe *vs.* Etats-Unis, une façon d'évaluer ces heuristiques est justement de mesurer leur capacité à rendre compte de cette inversion de tendance hiérarchique entre les niveaux.

Simpop3 spécifie des agents à deux niveaux :

- Au niveau le plus fin, niveau *micro*, sont spécifiés des *agents fonctions* qui sont les mêmes que ceux définis au niveau *méso* mais dotés de comportement supplémentaires leur permettant d'agir au niveau *micro*, c'est-à-dire de se localiser parmi les quartiers de la ville. Ce sont les agents de *simpopNano*.
- Au niveau intermédiaire, niveau *méso*, on spécifie des *agents villes*, capables d'interactions entre eux, ainsi que des *agents fonctions*, capables de se localiser parmi les villes, et qui offrent aux villes qui les possèdent de nouvelles capacités d'interaction. Ce sont les agents de Simpop2.

Le principe de l'exécution de ce couplage de modèles consiste en l'exécution alternée d'une itération de Simpop2, et d'une itération de *simpopNano* pour chaque ville dont on souhaite simuler la structure spatiale interne :

- Simpop2 calcule à chaque pas de temps les échanges entre villes, la ventilation spatiale des innovations et la croissance résultante, et détermine en conséquence l'état suivant de chaque ville : une liste de fonctions, et l'effectif et le budget de chacune ;
- ces sorties sont les données d'entrée de *simpopNano*, qui calcule la ventilation des effectifs des fonctions possédées par la ville au sein de ses quartiers. Les fonctions payent leur implantation dans les quartiers grâce à leur budget, calculé au niveau Simpop2, à la suite des échanges avec d'autres villes. En sortie d'itération, *simpopNano* produit un indicateur de la qualité de l'implantation des fonctions à l'intérieur de la ville.
- cet indicateur de « performance spatiale » est pris en compte par les fonctions urbaines au niveau Simpop2 pour décider de la ville où elles vont s'implanter. La boucle inter-niveaux est bouclée : nous modélisons à la fois des causalités descendantes et ascendantes.

Le cas difficile mentionné en introduction du chapitre ne se retrouve donc pas ici. Les variables (budgets) des entités partagées (les fonctions urbaines) par Simpop2 et *simpopNano* qui sont modifiées par ces deux modèles ne le sont jamais en parallèle. L'accès à ces variables est protégé, et l'ordonnancement des itérations de chacun des deux modèles est complètement séquentiel.

Agents et niveaux

Dans Simpop2 le niveau spatial de spécification du modèle, celui où la connaissance géographique est injectée dans les agents et comportements, est celui des villes : les villes sont des entités indivisibles, ce sont les agents du modèle (niveau micro). Le niveau système de villes constitue le niveau émergent (niveau macro) (cf. figure 6.4).

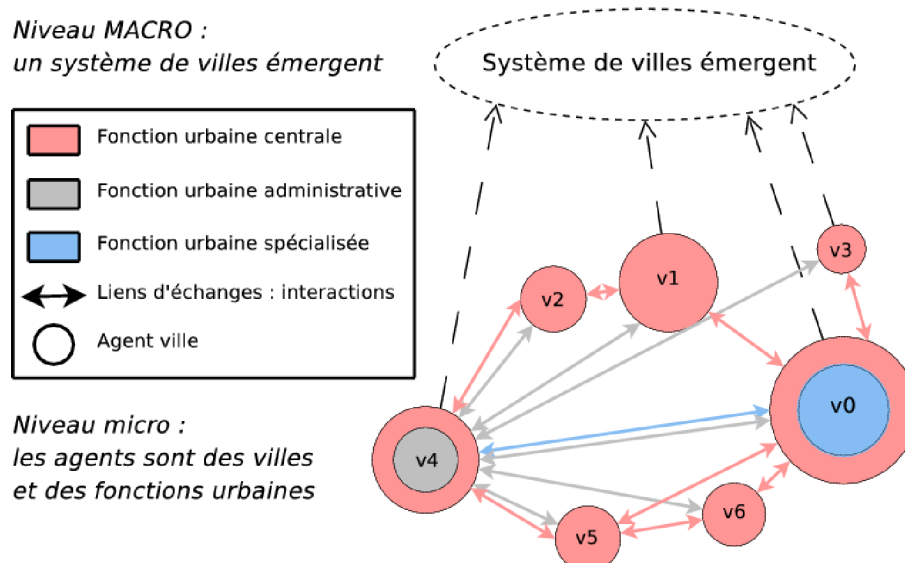


FIG. 6.4 – Simpop2 [PSB⁺09] : un SMA mono-niveau où les interactions entre *agents villes* par le biais d'*agents fonctions urbaines* font émerger un système de villes spatialement organisé.

Dans *simpopNano* le niveau spatial de spécification est celui des fonctions et des quartiers (niveau micro), dans lesquels doivent se localiser *ces mêmes fonctions urbaines* acquises par la ville au niveau système dans Simpop2. Le niveau ville constitue le niveau émergent (niveau macro) (cf. figure 6.5).

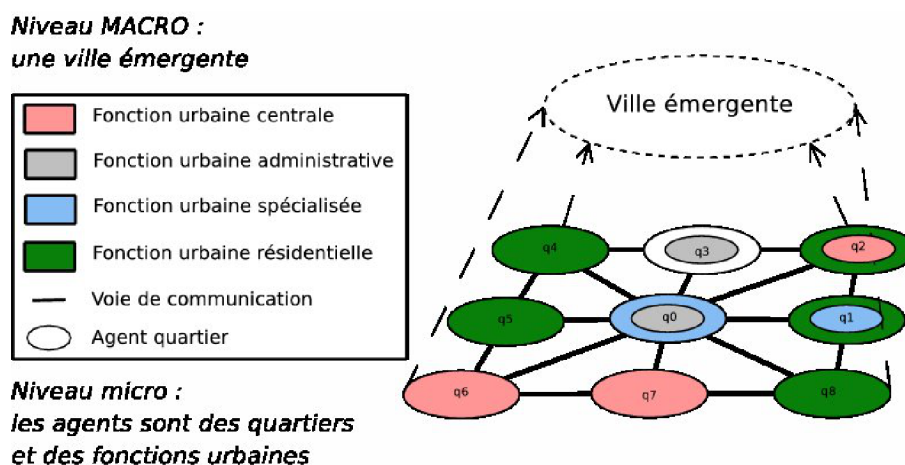


FIG. 6.5 – *simpopNano* : un SMA mono-niveau où les interactions entre *agents quartiers* et *agents fonctions urbaines* font émerger une ville spatialement organisée.

Il ne s'agit donc pas de la « même » ville que celle de Simpop2 : celle de *simpopNano* est une entité qui n'existe que dynamiquement, à travers une superposition de mesures qui permettent au géographe de décider si la structure émergeant de son modèle ressemble ou non à une ville. Pour Simpop3 nous avons donc été confrontés au besoin de réconcilier ces deux représentations de la ville en construisant un pont entre la ville spécifiée au niveau micro de Simpop2 et celle, émergente, au niveau macro de *simpopNano*. Ce besoin est illustré par la figure 6.6.

Pour réaliser cette articulation entre les deux modèles, c'est avant tout un travail de négociation

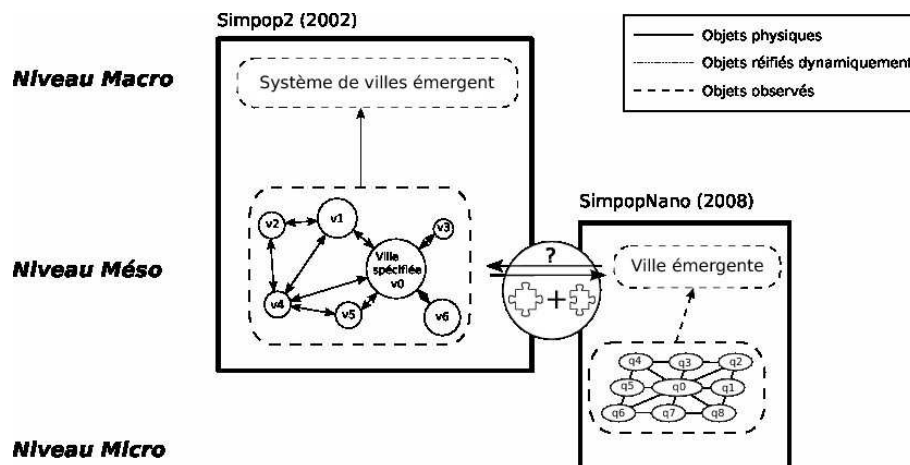


FIG. 6.6 – Simpop3 : comment articuler l'agent ville *spécifié* de Simpop2 avec la ville *émergente* de simpopNano ?

ontologique que nous avons réalisé avec les géographes. Nous avons choisi d'identifier un « acteur » qui soit commun aux deux modèles, qui puisse représenter à la fois un effet de la dynamique du système des villes sur la ville, et qui puisse exprimer une dynamique interne à la ville susceptible d'avoir des effets en retour sur le système. La notion de *fonction urbaine* [PPK06] a donc été instanciée dans le programme en agent « inter-niveaux ». La fonction urbaine est à l'origine une notion définie pour qualifier un rôle joué par une ville au sein du système, et qui trouve donc sa pertinence au niveau du système de villes. Pour réaliser le couplage, la notion a été infléchie et l'hypothèse a été faite qu'elle pouvait être utilisée pour qualifier les grands types d'activités en interaction à l'intérieur de la ville au cours de son évolution. Ce choix se justifie par la période historique abordée. C'est en fait cette extension d'un concept qui permet d'utiliser la *fonction urbaine* comme un agent « tampon » qui permet de faire le lien entre les règles des deux modèles et de les coupler. D'un point de vue dynamique, les modèles sont ordonnancés comme schématisé sur la figure 6.7.

Du point de vue de la conception, l'idée de cette approche nous a été suggérée par la pré-existence de Simpop2 au moment de la conception et du développement de simpopNano. Deux motivations se sont rencontrées :

1. l'une, modélisatrice, d'une simplification des rapports inter-niveaux, pour identifier un acteur qui permette de faire le lien entre les logiques de localisation intra-urbaines, guidées par la compétition pour l'accessibilité et la recherche de synergies, et l'évolution d'une ville sur le long-terme au sein du système, où elle se spécialise en interagissant avec ses semblables tout en les concurrençant pour acquérir les innovations ;
2. l'autre, « économique », de réutilisation d'un maximum de classes déjà programmées et participant à l'ontologie de Simpop2.

Ces deux raisons nous ont conduit à faire le pari de la réutilisation des fonctions urbaines comme acteurs intra-urbains pour simpopNano et donc pour Simpop3. La figure 6.8 donne un exemple des étapes successives de l'élaboration d'une arborescence de classes permettant la programmation du modèle, actuellement en cours.

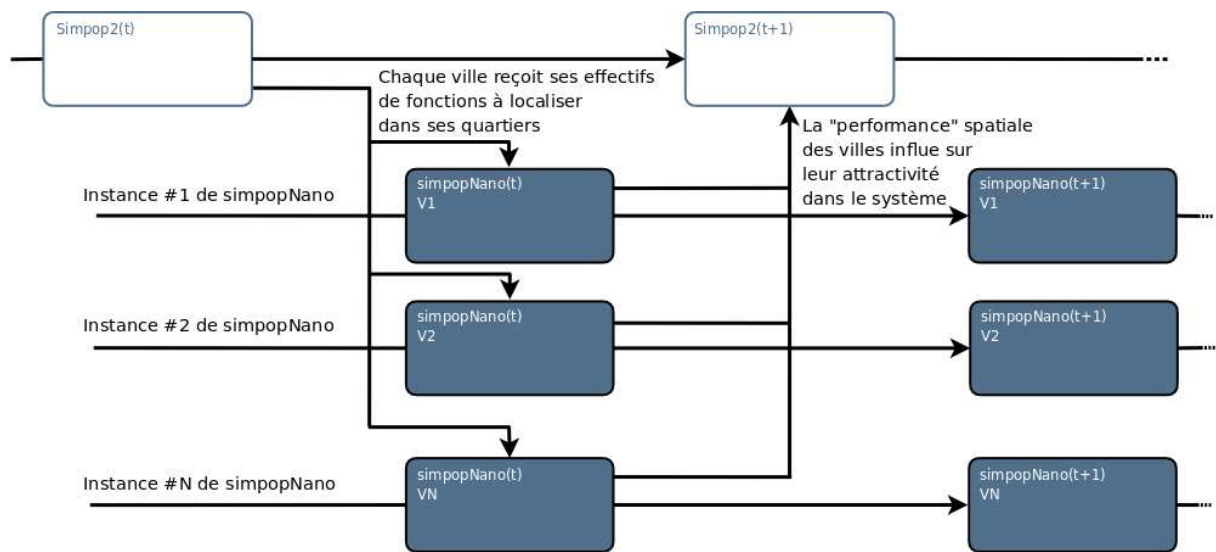


FIG. 6.7 – Articulation dynamique de Simpop2 et de simpopNano dans Simpop3, un SMA multi-niveaux pour tester des heuristiques liant théorie évolutionnaire urbaine et théories de la localisation.

5 Vers des organisations multi-agents multi-niveaux

Après avoir rendu compte de différentes expériences de modélisation à base d'agents à de multiples niveaux d'organisation simultanément, il s'agit maintenant d'essayer de généraliser leurs cas d'application. A partir des exemples présentés et d'autres modèles de la littérature, nous proposons une première catégorisation des modèles multi-niveaux, en vue de faciliter leur conception et leur implémentation. Nous avons identifié trois classes :

1. les *multi-modèles* ;
2. les *modèles à spécification multi-niveaux* ;
3. les *modèles multi-niveaux à réification dynamique*

5.1 Multi-modèles

Il s'agit du couplage de plusieurs modèles à l'origine indépendants. On considère des modèles à des niveaux différents en interaction. Les sorties des modèles de niveau supérieur servent à définir des paramètres globaux des modèles de niveau inférieur et les sorties des modèles de niveau inférieur sont considérées comme des flux d'entrée dans les modèles de niveau supérieur. On peut distinguer encore deux sous-catégories :

1. les différents modèles s'exécutent de manière alternée (c'est le cas par exemple de Simpop3). Dans ce cas, le couplage entre les modèles est généralement faible mais des difficultés peuvent néanmoins apparaître si les différents modèles partagent des objets qu'ils peuvent chacun modifier (l'entité ville dans le cas de Simpop3).
2. un modèle multi-agents est encapsulé à l'intérieur d'un agent de niveau supérieur. Si l'on pense au modèle de tumeurs, cela correspondrait au fait que l'on modélise la dynamique interne des cellules, plutôt que de considérer une production à taux fixe de molécules de PAI-1. Cela permettrait alors de prendre en compte les réseaux de régulation génique contrôlant la production de PAI-1. Il faut faire attention, dans ce cas, à l'ordonnancement

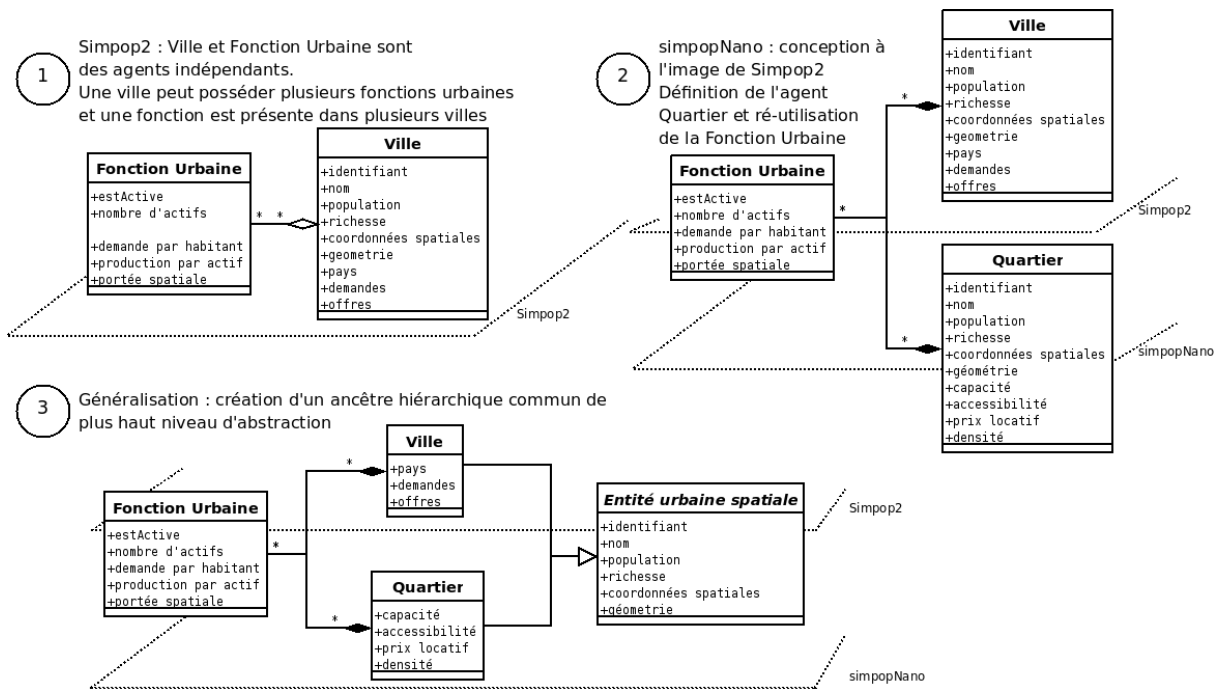


FIG. 6.8 – Conception incrémentale d'une partie de l'ontologie multi-niveaux. Partant d'un existant (Simpop2, étape 1), on construit un nouveau modèle et un type de données associé (Quartier) mais on réutilise également un type existant (Fonction urbaine), éventuellement en le complétant, et qui jouera le rôle d'agent « inter-niveaux » permettant la communication (étape 2). Finalement, par généralisation des deux types Quartier et Ville, on crée un type de données abstrait et multi-niveaux (étape 3). Si l'on souhaite par la suite ajouter de nouveaux types d'unités spatiales, ils peuvent alors hériter des propriétés communes regroupées dans la classe Entité urbaine spatialisée.

de l'activité des agents aux différents niveaux, qui n'intervient pas nécessairement à la même échelle temporelle.

5.2 Modèles à spécification multi-niveaux

Il s'agit de la cohabitation et de l'interaction, au sein d'un même modèle, d'agents situés à des niveaux différents le long des échelles spatiale, temporelle ou quantitative. On peut y parvenir d'au moins deux façons différentes :

1. *par spécification statique* des entités simulées (par exemple des cellules qui interagissent avec des molécules dans le modèle de tumeur ; des personnes qui interagissent avec des quartiers dans le modèle Accessim [DLNL08], Simpop3). A nouveau apparaissent des problèmes liés à l'ordonnancement des agents. Par exemple, les mécanismes de réaction de cellules et de molécules interviennent à des résolutions temporelles très 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.
2. *par spécification dynamique* des entités simulées : implémentation de mécanismes de type « loupe dynamique » qui permettent d'augmenter le degré de résolution spatiale sur des zones critiques. (par exemple le modèle fractal de l'environnement proposé par [MCD⁺08]). La difficulté principale dans ce cas réside dans l'adaptation continue nécessaire pour

toujours conserver le plus haut degré de détail sur les zones d'intérêt, par exemple celles où se trouvent des agents.

5.3 Modèles multi-niveaux à réification dynamique

Il s'agit de modèles qui produisent des agents de niveau supérieur par « observation » automatique de la simulation, caractérisation de structures de plus haut niveau et réification de ces structures sous forme d'objets ou agents. On peut là encore distinguer deux cas distincts :

1. les agents des deux niveaux n'interagissent pas directement les uns avec les autres (par exemple simulBogota) car les entités des deux niveaux ne sont pas dans le même espace de modélisation. D'une certaine manière, ce cas ressemble au cas (1), puisque l'on aura également une alternance entre l'exécution de modèles au niveau micro et macro : le simulateur exécute en effet en boucle l'évolution du modèle au niveau micro puis son analyse au niveau macro (constitution dynamique du niveau macro), puis l'évolution du modèle au niveau macro.
2. les agents des deux niveaux peuvent interagir entre eux et avec les agents de l'autre niveau : les entités des deux niveaux sont dans le même espace de modélisation (par exemple le modèle de tumeur intégrant le modèle agrégé, RIVAGE [SPTD98], ou encore [GGG⁺08] qui se base sur des approches hiérarchiques de type holoniques). Cette approche entraîne une plus grande complexité puisqu'elle nécessite de pouvoir à la fois détecter l'apparition d'une structure émergente, caractériser sa dynamique et ses interactions avec les autres agents, vérifier que la simulation reste valide, et enfin vérifier les conditions de maintien de la structure émergente. Il s'agit ainsi de contrôler de manière dynamique aussi bien la réification de structures émergentes à partir d'agents individuels, que leur disparition lorsque les conditions de maintien ne sont plus vérifiées.

6 Conclusions du chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs modèles à base d'agents qui peuvent tous, d'une manière ou d'une autre, être qualifiés de « multi-niveaux ». Ces modèles sont pourtant très différents les uns des autres, tant du point de vue de la taille des entités modélisées que des approches mises en oeuvre pour pallier les difficultés engendrées par le couplage de différents niveaux d'organisation. Après avoir clarifié les notions d'échelle et de niveau, nous avons souligné qu'il nous semblait plus juste de parler de « modèles multi-niveaux » que de « modèles multi-échelles ». Nous avons ensuite proposé une grille d'analyse permettant la classification de différents types de modèles multi-niveaux, à l'intérieur de laquelle nous avons positionné les trois modèles étudiés. Celle-ci demande à être complétée et raffinée en y intégrant d'autres travaux de la communauté.

Ce faisant, nous ne prétendons pas proposer une méthodologie de conception de modèles multi-niveaux, qui puisse être réutilisée, étape par étape, pour la conception d'un nouveau modèle. L'objectif est d'une part de montrer que différentes problématiques de modélisation peuvent conduire à des solutions très différentes et d'autre part d'aider le concepteur à identifier les points durs de chacune des approches. L'identification de ces difficultés nous a conduit à proposer quelques pistes de réalisation de couplage inter-niveaux et orientés agent. Leur pertinence a été établie pour les exemples étudiés, ainsi que pour d'autres issus de la littérature.

Lorsque des modèles existent dans un domaine particulier et qu'ils ont prouvé leur efficacité, il est à la fois utile et important de pouvoir les intégrer comme des composants dans des modèles de plus grande envergure. Cela implique de permettre le couplage de modèles à différents niveaux,

ou fondés sur des formalismes hétérogènes (discret/continu par exemple). Pour ce faire, d'une part des modèles microscopiques peuvent être encapsulés sous formes d'agents, d'autre part des modèles continus (par exemple des modèles à base d'équations différentielles) peuvent servir dans la définition de variables et dynamiques globales utilisables comme entrées de modèles de niveau supérieur.

Parce que les systèmes complexes évoluent de manière dynamique, il est également important que la structure du SMA, le nombre et la granularité de ses agents puissent, eux aussi, évoluer dynamiquement. Pour ce faire, il est nécessaire de permettre la détection [Mon08] et la réification automatique de structures émergentes, et réciproquement de permettre le découpage d'agents en organisations sous-jacentes, de manière interactive. En adaptant les niveaux de description du système, il ne s'agit pas tant de gagner en performances computationnelles (la puissance de calcul continuera à croître), que de gagner en pouvoir explicatif en articulant les niveaux de description pertinents aux yeux des experts, pour obtenir la plus grande compréhension possible des mécanismes à l'oeuvre dans le système complexe étudié. Inversement, l'intégration de niveaux a aussi un fort pouvoir de clarification en amont en obligeant à une explicitation des mécanismes inter-niveaux et à une formalisation enrichie par rapport à l'angle micro-macro.

Chapitre 7

Conclusion générale

1	Bilan de la contribution	207
1.1	Contributions par les modèles géographiques construits	208
1.2	Contributions à la réflexion sur le multi-niveaux et sur les environnements de simulation	209
2	Limites et poursuites	211
3	Perspectives	211

Can we actually "know" the universe? My God, it's hard enough finding your way around in Chinatown. The point, however, is : Is there anything out there? And why? And must they be so noisy? Finally, there can be no doubt that the one characteristic of "reality" is that it lacks essence. That is not to say it has no essence, but merely lacks it. (The reality I speak of here is the same one Hobbes described, but a little smaller.) Therefore the Cartesian dictum "I think, therefore I am" might be better expressed "Hey, there goes Edna with a saxophone!" So, then, to know a substance or an idea we must doubt it, and thus, doubting it, come to perceive the qualities it possesses in its finite state, which are truly "in the thing itself", or "of the thing itself", or of something or nothing. If this is clear, we can leave epistemology for the moment.

Woody ALLEN

1 Bilan de la contribution

Il est temps de conclure. Nous avons dit dans notre chapitre introductif, que nous envisageons nos travaux comme situés à l'intersection de trois domaines de recherches : la recherche en géographie de schémas explicatifs théoriques, spatiaux et formalisés de l'évolution long-terme des formes des systèmes urbains ; celui sur la simulation multi-agents de systèmes complexes (et en particulier la problématique de l'articulation de multiples niveaux d'organisation), et enfin celui sur les environnements de simulation. Nous essayons de faire un bilan des résultats sur ces trois points.

1.1 Contributions par les modèles géographiques construits

Objectifs initiaux Nous avons déjà fait, dans les conclusions de leurs chapitres respectifs, le bilan des résultats obtenus jusqu'à alors **Simpop2** et **simpopNano**. Nous rappellerons ici uniquement les plus importants. Nous nous étions demandé dans le chapitre 3 si il était possible de trouver des expressions mécanisées, acceptables pour les géographes, d'une théorie évolutionnaire urbaine et de théories de la localisation, qui permettent de comparer les morphogenèses des villes et des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis. Plus généralement, ces modèles devaient permettre d'étudier jusqu'à quel point un espace, lorsqu'on y plonge une théorie universelle, est responsable des différences de modalité prises par les formes d'organisation (hiérarchiques, spatiales et temporelles) auxquelles les processus inclus dans la théorie peuvent donner naissance.

Simpop2 et l'espace. Pour la théorie évolutionnaire urbaine et les formes de systèmes de villes, **Simpop2** et ses expériences, encadrées par la prise en contexte historique et économique que la théorie ne cherche pas à expliquer, ont répondu : les deux espaces seuls ne suffisent pas à rendre compte de cette variété de formes entre Europe, Etats-Unis et Afrique du Sud. Il faut augmenter les processus génératifs postulés par la théorie de mécanismes spécifiques dont certains relèvent de l'espace ($\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{Gisements} \rangle$, $\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{Colo.Spatiale} \rangle$), dont d'autres peuvent être rattachés aux contextes historiques différents assumés par la théorie ($\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{Transports} \rangle$), mais il a également fallu supposer des différences que nous qualifierons, à défaut d'un mot meilleur, de différences de gouvernance politique et économique. En effet, c'est ce que nous semble traduire l'expression de $\langle \text{Obs}, \text{SVilles}, \text{Ports} \rangle$ à l'aide d'un mécanisme de taxe douanière bénéficiant à des villes passerelles dans les réseaux internationaux, et spécifique aux Etats-Unis. Mais les conditions difficiles de l'expérimentation, qui en particulier n'a pas pu donné lieu à un grand nombre de simulations (par absence d'un outillage qui permette de systématiser la comparaison des configurations produites par différents paramétrages du modèle générique), ces conditions rendraient caduques des conclusions plus fortes. Ce constat n'enlève rien à l'apport très important d'un modèle comme celui-ci à une équipe de recherches. Il indique juste qu'au vu de la complexité engendrée par les règles du modèle lui-même, l'outillage doit permettre d'effectuer d'importants volumes de simulations et de les comparer sur des indicateurs synthétiques qui traduisent les motifs recherchés.

simpopNano et l'espace. Pour les théories de la localisation et les formes de villes, **simpopNano** et ses premières expériences, encadrées un contexte historique et économique que nous avons supposé le même dans les deux cas (exprimé par des profils-moyens d'évolution des effectifs de fonctions et de leurs budgets, gardés à l'identique pour les deux géométries), semble nous répondre que OUI : l'espace seul (en l'occurrence la forme du maillage élémentaire des réseaux viaires) peut permettre d'expliquer les différences de formes (à l'image des différences observées) auxquelles les mêmes processus peuvent donner naissance. Mais nous ne pouvons vraiment pas interpréter ces investigations géométriques, formelles, calculatoires, de façon plus poussée géographiquement, au moins pour le moment. La tentation est grande d'exhiber ces résultats et de leur faire porter la preuve que, si les villes américaines sont plus étalées que les européennes, c'est à cause d'un maillage orthogonal qui « porterait en lui », avec son carrefour égalitaire, le germe de l'étalement urbain. Mais non, nous ne pouvons pas aller plus loin dans nos conclusions, pour de nombreuses raisons que nous avons relevé à la fin du chapitre 5, mais avant tout parce qu'un modèle de simulation comme le nôtre *ne prouve pas une explication candidate à l'évolution d'un territoire*. Il peut la conforter, il peut lui donner beaucoup de force et permettre de la situer parmi des explications concurrentes, mais ses conclusions s'arrêteront là.

2^{nano} = 3 Mais la question profondément originale de notre projet de modélisation concernait avant tout la mise en relation, dans un modèle dynamique et semble-t-il pour la première fois, d'acteurs et de leurs interactions à trois niveaux de l'échelle spatiale : le quartier, la ville et le système des villes. Nous savions que la prise en compte simultanée de ces niveaux était nécessaire pour étudier le remarquable basculement de l'organisation hiérarchique des systèmes urbains européen et américain, lors du passage de l'intra à l'inter-urbain. Si les influences descendantes, du contexte imposé par le système des villes à la ville en développement, sont bien connues et théorisées, les influences ascendantes en revanche, de l'organisation spatiale interne de la ville sur sa trajectoire, sont plus incertaines. En l'absence de certitudes, la construction du modèle **Simpop3** nous sert déjà au moins à structurer le savoir sur ces différents niveaux et à les relier. Ce travail a été fait, avec la construction d'une ontologie urbaine multi-niveaux *calculable*, comme nous l'avons prouvé dans le chapitre 6 (certes sans exhiber de programme, en cours d'implémentation, mais en établissant de façon évidente sa faisabilité). Le modèle peut de plus nous servir à mesurer les effets de processus qui demeurent assez fortement hypothétiques, dans la mesure où à la vue de l'ampleur des systèmes considérés (du quartier au continent...), nous avançons nécessairement aujourd'hui un peu « à l'aveugle ». Ces constructions sont nécessaires pour raisonner sur l'incidence que pourrait avoir une gouvernance spatiale maîtrisée sur la compétitivité d'une ville au sein de ses réseaux. Car si nous manquons aujourd'hui de recul pour évaluer cette dépendance¹, il paraît impensable qu'elle ne finisse pas par en avoir une, cruciale (au moins faut-il le souhaiter).

1.2 Contributions à la réflexion sur le multi-niveaux et sur les environnements de simulation

Sur les deux points du multi-niveaux et des environnements de simulation, notre conviction est que les systèmes multi-agents ont un rôle important à jouer. Enfin !, pourrait-on dire, tant il nous semble qu'il existe un écart important entre l'ambition des travaux informatiques sur les agents et systèmes multi-agents *intelligents* pour *résoudre des problèmes*, et les agents utilisés en simulation, dont nous avons montré dans le chapitre 2 que leur succès comme approche de calcul en simulation sociale était due, selon nous, plus à une analyse descriptive socialement-orientée des problèmes, qu'à des réalisations techniques bien identifiées. Mais sur les nouveaux chantiers ouverts par la transtion depuis la conception de simulations classiques vers celle d'architectures multi-niveaux et d'environnement de simulation, les SMA trouvent une nouvelle pertinence. Les nouvelles sociétés d'agents à imaginer ne sont plus uniquement celles à simuler, mais celles travaillant sur les simulateurs.

Contributions à la réflexion multi-niveaux

De façon transversale, nous avons profité des travaux multi-niveaux entamés avec **Simpop3** pour mener une réflexion sur ce qui faisait d'une approche de calcul une approche bien adaptée pour offrir des représentations multi-scalaires dynamiques. Nous avons initié, avec d'autres modélisateurs, en biologie et en géographie, une comparaison d'approches permettant de spécifier et d'articuler de la connaissance à de multiples niveaux. En effet, il nous semble que les difficultés contemporaines du projet calculatoire en géographie incluent la mise en relation de modèles à différents niveaux d'organisation spatiale des peuplements. D'une façon qui nous semble assez paradoxale, bien que porteuse depuis ses débuts de meta-modèles organisationnels multi-niveaux,

¹cette prise de conscience affichée, qu'il est devenu obligatoire (en termes de gestion des ressources environnementales) de favoriser des formes urbaines soutenables, étant très récente en comparaison de l'âge des systèmes urbains.

la simulation multi-agents n'a jusqu'à présent été mise en oeuvre que très majoritairement sur des problèmes de types micro↔macro. Dans ces modèles à base d'agents, lorsque des niveaux additionnels sont spécifiés par rapport au niveau des entités et de leurs interactions, ils le sont par des entités spéciales comme l'*environnement*, qui encapsule des modèles d'évolution de variables contextuelles, mais qui sont beaucoup plus agrégés que les entités du niveau micro simulé. Ce constat nous a amené à réfléchir sur les raisons de cet état de fait², et nous en avons conclu qu'il s'agissait probablement et avant tout d'un problème ontologique, et de la capacité des experts à simplifier et filtrer la description de façon à en extraire une description multi-niveaux calculable comme des SMA imbriqués. Mais notre comparaison nous a également montré que, même quand une telle ontologie ne peut pas être négociée, des systèmes multi-agent et multi-niveaux pouvaient tout de même être mis à profit pour par exemple améliorer la performance du calcul, ou amoindrir la complexité du phénomène simulé en réduisant la diversité des entités.

Contributions sur les environnements de simulation

Un autre axe de recherches important acutellement en simulation de systèmes complexes est de répondre aux besoin d'outils intelligents et potentiellement multi-agents, venant appuyer la réflexion sur les sorties générées en systématisant la démarche expérimentale. Pour donner chair à ces idées, nous avons initié un travail de réflexion, que nous espérons au long cours, sur ce que devrait être l'environnement de simulation d'une équipe d'analyse spatiale comme l'équipe PARIS du laboratoire Géographie-Cités. Un tel environnement devrait permettre d'exploiter les modèles existants du laboratoire comme ceux qui sont actuellement développés. Envisager l'expérimentation comme un *problème quantifié à résoudre* plutôt que comme un parcours aveugle à la frontière de l'épistémologie permet sûrement d'éviter de trop souvent dériver vers ces attracteurs étranges que sont des concepts comme l'émergence ou la validation. Il ne s'agit pas tant de mettre en question leur fertilité pour faire progresser notre appréhension de la complexité, que de reconnaître qu'en dépit d'une littérature abondante depuis une vingtaine d'années, elles n'ont pas aujourd'hui de définition qui fasse consensus et qui permette de les opérationnaliser. [ARB06] ont insisté sur le piège que constitue l'invocation systématique de la validation, notion paralysante par excellence. A la suite des auteurs, ne parlons donc plus de validation mais d'*évaluation*.

Même si la formalisation et les développements effectués à ce jour ne sont pas suffisamment matures pour parler sérieusement d'environnement d'exploitation multi-agents, nous pensons tout de même avoir commencé à tracer un chemin dans cette direction. Certes les nouveaux composants actuels (les algorithmes de calibrage, les composants construisant les éléments de rapports et les déposant sur le wiki, le composant permettant de construire des rapports structurés à partir d'éléments de rapports, etc.) sont tout juste fonctionnels, pas encore véritablement testés, et donc encore loin, aussi bien dans leur conception que dans leur programmation, d'un niveau de sophistication qui permettrait d'envisager de les faire communiquer et collaborer au sein d'environnements qui assistent utilement l'expérimentateur. Mais les idées sont là, et d'autres travaux développés au sein de l'équipe, cherchant par exemple à détecter et caractériser, de manière automatique, l'apparition de structures émergentes [Hut10], sont à intégrer à ce travail logiciel.

²Nous sommes partis du principe qu'imaginer des SMA imbriqués, où le motif agent-SMA était récursivement reproductible, n'était pas fantastiquement original...

2 Limites et poursuites

Enormément de choses restent à faire pour atteindre nos objectifs initiaux, qui étaient d’offrir aux géographes un modèle opérationnel pour étudier la question d’origine ayant motivé la thèse.

D’une part nous avons vu, dans les sections discutant des expériences, ainsi que dans les conclusions des chapitres 4 et 5, que les résultats qui ont été obtenus à ce jour nous incitent à la réserve. D’une part sur **Simpop2**, seule une petite partie de l’espace des paramètres a été couvert par les expérimentations menées à ce jour. Pour **simpopNano**, nous avons épuisé l’ensemble des combinaisons possibles pour les instances de règles proposées, mais d’une part celles-ci seraient probablement considérées comme naïves par un spécialiste de l’économie géographique comme par un spécialiste de la géographie économique. Nous avons vu que le nombre de valeurs que nous supposons constantes mais qu’il serait nécessaire de modifier, pour se faire une idée de la sensibilité des résultats à leur valeur, était extrêmement important par rapport au nombre de paramètres actuels du modèle dont nous avons fait varier la valeur.

D’autre part, le développement de **Simpop3** reste à faire, et à l’heure actuelle, ces questions originales restent orphelines d’un modèle « complet » et intégré permettant de les étudier par simulation...

3 Perspectives

L’interdisciplinarité est changeante : stimulante et frustrante, inconfortable et enrichissante, créative mais lente, elle est avant tout nécessaire. Ces chantiers *multi-niveaux* et *environnementaux* ne pourront être poursuivis sans une collaboration étroite entre géographes et informaticiens. Notre désir est donc de poursuivre ensemble le chemin entamé il y a quatre ans et de nous y inscrire dans la durée. Les travaux présentés dans ce manuscrit doivent être poursuivis, amplifiés, systématisés. Nos perspectives de recherches futures se déclinent dans plusieurs directions.

(Re-)développements et nouveaux langages. Le redéveloppement de parties de **Simpop2** pour le pérenniser, après en avoir extrait une API, est une des prochaines étapes nécessaires du projet. Nous pensons sur ce point qu’il serait particulièrement intéressant d’évaluer la fertilité de l’introduction de langages dédiés à la simulation spatiale. A l’heure actuelle, nos implémentations sont trop verbeuses, et ne sont vérifiables que par des programmeurs. La sémantique est mal dissociée des opérations de contrôle et d’ordonnancement, qui tout en influant critiquement les calculs et les résultats de simulation [Bom09], ne devraient pas interférer avec le coeur sémantique du modèle opérationnel. Un langage de haut niveau pour la simulation de SD doit enfermer ces aspects contrôle et ordonnancement dans une syntaxe adaptée au domaine d’application pour rendre le programme beaucoup plus expressif. MGS est un langage déclaratif expérimental construit sur des notions et des outils de nature topologique, et se veut particulièrement adapté à la spécification concise et à la simulation de SD à structure dynamique. Le gain en expressivité apporté par son approche topologique a été prouvé sur de nombreux exemples non triviaux de SD à structure dynamique en physique et en chimie notamment, mais aussi sur des problèmes relevant de la CAO et de l’analyse numérique ou encore sur des questions de morphogenèse biologique.

D’autres perspectives concernent les poursuites des travaux entamés et présentés dans ce manuscrit :

- l’exploration statistique des sorties de **simpopNano**, le test de nouveaux réseaux de villes réelles, l’intégration de nouvelles instances des différentes règles, l’intégration de contraintes

environnementales (fusion avec d'autres modèles en cours de développement à GÉOGRAPHIE-CITÉS : `simpopClim`, `simpopRéseaux`, etc.)

- le développement du couplage dynamique de `simpopNano` et `Simpop2` en `Simpop3`
- la poursuite du développement des nouveaux outils d'exploitation et leur mise à l'épreuve lors de campagnes de simulation futures, à commencer par celles de `simpopNano` et `Simpop3`, mais aussi d'autres modèles
- le développement de nouveaux modules d'évaluation à intégrer dans cet environnement. Par exemple, plusieurs méthodes d'optimisation pourraient mises en concurrence pour calibrer les modèles ; l'implémentation de filtres, dont le but serait de tenter d'asservir le modèle à suivre une trajectoire désirée en ajustant dynamiquement la valeur de ses paramètres de contrôle est également une piste à explorer. L'incorporation de modules développés par G. Hutzler et ses collègues, visant la caractérisation, de manière automatique, de structures émergentes, est une autre piste dans cette direction.

Bibliographie

- [Abr04] Géraldine Abrami. *Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agent pour la gestion de ressources renouvelables. Application à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme*. Thèse de doctorat, ENGREF, 2004.
- [AED⁺02] Robert L. Axtell, Joshua M. Epstein, Jeffrey S. Dean, George J. Gumerman, Alan C. Swedlund, Jason Harburger, Shubha Chakravarty, Ross Hammond, Jon Parker, and Miles Parker. Population growth and collapse in a multiagent model of the kayenta anasazi in long house valley. *PNAS*, 99(Suppl.3) :7275–7279, 2002.
- [AJ02] S.W. Ambler and R. Jeffries. *Agile modeling : effective practices for extreme programming and the unified process*. John Wiley & Sons New York, 2002.
- [All07] Sylvain Allemand, editor. *Comment je suis devenu géographe ?* Le Cavalier Bleu, 2007.
- [Alo64] W. Alonso. *Location and Land Use*. Harvard University Press, 1964.
- [AM04] A. Aguilera and D. Mignot. Urban sprawl, polycentrism and commuting. a comparison of seven french urban areas. *Urban Public Economics Review*, 1 :93–114, 2004.
- [AM05] Walid Ali and Bernard Moulin. *COSIT 2005*, chapter 2D-3D MultiAgent Geo-Simulation with Knowledge-Based Agents of Customers Shopping Behavior in a Shopping Mall, pages 445–458. LNCS 3693. Springer-Verlag, 2005.
- [Amb03] Frédéric Amblard. *Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées. Application à des modèles de dynamiques d'opinions*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2003.
- [ARB06] Frédéric Amblard, Juliette Rouchier, and Pierre Bommel. Evaluation et validation de modèles multi-agents. In Frédéric Amblard and Denis Phan, editors, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, chapter 4, pages 103–140. Hermès, 2006.
- [Arc98] Collectif Archaeomedes. *Des oppida aux métropoles*. Collection Villes. Economica, 1998.
- [AS79] Peter M. Allen and Michèle Sanglier. A dynamic model of growth in a central place system. *Geographical Analysis*, 11 :256–272, 1979.
- [Aud95] F. Audigier, editor. *Construction de l'espace géographique*. INRP, Paris, 1995.
- [Axt07] Robert L. Axtell. *Agent based modelling and simulation in the social and human sciences*, chapter The end of the beginning for multi-agent systems social science. The Bardwell Press, Oxford, 2007.

- [BAEK87] W. Brian Arthur, Y.M. Ermoliev, and Y.M. Kaniovski. Path-dependent processes and the emergence of macro-structure. *European Journal of Operational Research*, 30(3) :294–303, 1987.
- [Bai85] Paul Bairoch. *De Jéricho à Mexico*. Gallimard, 1985.
- [Bal98] Osman Balci. *Handbook of simulation : principles, methodology, advances, applications, and practice*, chapter Verification, validation, and testing, pages 335–393. John Wiley & Sons, 1998.
- [BAN05] Itzhak Benenson, Shai Aronovich, and Saar Noam. Let’s talk objects : generic methodology for urban high-resolution simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29 :425–453, 2005.
- [Bat01] Michael Batty. Polynucleated urban landscapes. *Urban studies*, 38(4), 2001.
- [Bat05] Michael Batty. *Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals*. M.I.T. Press, Cambridge, MA, 2005.
- [Bat08] Michael Batty. Fifty years of urban modeling : Macro-statics to micro-dynamics. In S Albeverio, D. Andrey, P. Giordano, and A. Vancheri, editors, *The Dynamics of Complex Urban Systems : An Interdisciplinary Approach*, chapter 1, pages 1–21. Springer, 2008.
- [BBC88] Paul Bairoch, Jean Batou, and Pierre Chèvre. *La population des villes européennes, 800-1850. Banque de données et analyse sommaire des résultats*. Droz, Genève, Genève, 1988.
- [BBM07] Dominique Badariotti, Arnaud Banos, and Diego Moreno. Conception d’un automate cellulaire non stationnaire à base de graphe pour modéliser la structure spatiale urbaine : le modèle remus. *Cybergeo*, (403), octobre 2007.
- [BBPLP98] François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton, and Christophe Le Page. Cormas : Common-pool resources and multi-agent systems. In Angel Pasqual del Pobil, José Mira, and Moonis Ali, editors, *Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence*, volume 1416 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 826–837. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.
- [BCW⁺94] C.S. Bertuglia, G.P. Clarke, A.G. Wilson, et al. *Modelling the City – Performance, Policy and Planning*. Routledge, 1994.
- [BD10] Anne Bretagnolle and François Delisle. Formes de villes en europe et aux États-unis. *Mappemonde*, 97(1), 2010. en ligne à <http://mappemonde.mgm.fr/num25/lieux/lieux10101.html>.
- [BDDEFS05] Rafael H. Bordini, Mehdi Dastani, Jürgen Dix, and Amal El Fallah Seghrouchni, editors. *Multi-Agent Programming : Languages, Platforms and Applications*. Springer, 2005.
- [Ben07] Itzhak Benenson. Warning! the scale of land-use ca is changing! *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(2) :107–113, March 2007.
- [Ber64] Brian Berry. Cities as systems within systems of cities. *Papers of the Regional Science Association*, 13 :147–163, 1964.
- [Ber04] Alain Bertaud. The spatial organization of cities : deliberate outcome or unforeseen consequence ? available online at <http://alain-bertaud.com/>, May 2004.
- [BG95] Jacqueline Beaujeu-Garnier. *Géographie Urbaine*. Colin, A., 1995.

- [BG99] François Bousquet and Denis Gautier. Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs". *Cybergeo*, 89, 1999. accessible à <http://cybergeo.revues.org/index2389.html>.
- [BGL⁺07] Anne Bretagnolle, Benoît Glisse, Thomas Louail, Denise Pumain, and Céline Vacchiani-Marcuzzo. Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents (europe, etats-unis). Colloque de Cerisy Systèmes complexes en sciences humaines et sociales, 26 mai-2 juin 2007, en ligne sur HAL (archives ouvertes), CCSD, Juin 2007.
- [BGL⁺08] Anne Bretagnolle, Benoît Glisse, Thomas Louail, Denise Pumain, and Céline Vacchiani-Marcuzzo. Categorizing urban systems through simulation (europe, united states, south africa). AAG, 2008 Annual Meeting, Boston, Massachusetts, April 2008.
- [BGM08] Anne Bretagnolle, Timothée Giraud, and Hélène Mathian. La mesure de l'urbanisation aux états-unis, des premiers comptoirs coloniaux aux metropolitan areas (1790-2000). *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]*, 427, 2008. <http://cybergeo.revues.org/index19683.html>.
- [BGPM⁺96] Stéphane Bura, France Guérin-Pace, Hélène Mathian, Denise Pumain, and Lena Sanders. Multi-agents system and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 28 :161–178, 1996.
- [BHS05] Michael Batty and Andrew Hudson-Smith. Urban simulacra : From real to virtual cities, back and beyond. *Architectural Design*, 75(6) :42–47, 2005.
- [BL94] Michael Batty and Paul Longley. *Fractal cities : a geometry of form and function*. Academic Press Professional, Inc. San Diego, CA, USA, 1994.
- [BL⁺06] Paul Bourguin, Annick Lesne, et al. *Morphogenèse. L'origine des formes*. Echelles. Belin, 2006.
- [BM03] Alain Bertaud and Stephen Malpezzi. The spatial distribution of population in 48 world cities : Implications for economies in transition. available online at <http://alain-bertaud.com/>, December 2003.
- [BOH02] Itzhak Benenson, Itzhak Omer, and Erez Hatna. Entity-based modeling of urban residential dynamics : the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B*, 29(4) :491–512, 2002.
- [Bom09] Pierre Bommel. *Définition d'un cadre méthodologique pour la conception de modèles multi-agents adaptée a la gestion des ressources renouvelables*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 2009.
- [BP08] Anne Bretagnolle and Denise Pumain. Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents (europe, États-unis). In H. Zwirn and G. Weisbuch, editors, *Complexité en Sciences Humaines et Sociales*. Vuibert, 2008.
- [BP09] Arnaud Banos and Lael Parrott, editors. *Revue internationale de Géomatique, numéro spécial « Simulation spatiale à base d'agents »*. Hermès Sciences, 2009.
- [BP10] Anne Bretagnolle and Denise Pumain. Simulating urban networks through multiscalar space-time dynamics (europe and united states, 17th -20th centuries). *Urban Studies*, 2010. to be published (accepted).
- [BPP02] Anne Bretagnolle, Fabien Paulus, and Denise Pumain. Time and space scales for measuring urban growth. *Cybergeo*, 219 :12 p., 2002. <http://www.cybergeo.eu/index3790.html>.

- [BPVM07] Anne Bretagnolle, Denise Pumain, and Céline Vacchiani-Marcuzzo. Les formes de systèmes de villes dans le monde. In M.F Mattei and D. Pumain, editors, *Données Urbaines (vol.5)*. Economica, 2007.
- [Bra99] André Brahic. *Enfants du soleil : histoire de nos origines*. Odile Jacob, 1999.
- [Bre09] Anne Bretagnolle. *Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée (France, Europe, Etats-Unis)*. Thèse d’habilitation à diriger des recherches, Université Paris I, 2009.
- [BRJ99] G. Booch, J. Rumbaugh, and I. Jacobson. *The UML user guide*. Addison-Wesley Reading, MA, 1999.
- [Bru80] Roger Brunet. La composition des modèles dans l’analyse spatiale. *L’Espace géographique*, 4, 1980.
- [BT04] Itzhak Benenson and Paul M. Torrens. *Geosimulation : Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*. Wiley, 2004.
- [BT08] Arnaud Banos and Thomas Thevenin. Création de champs de potentiel et simulation d’itinéraires à partir de l’enquête ménages-déplacements. In Marius Thériault and François Des Rosiers, editors, *Information géographique et dynamiques urbaines 1 : analyse et simulation de la mobilité des personnes*, Traité IGAT, chapter 4. Hermès, 2008.
- [Bun62] William Bunge. *Theoretical geography*. Number 1 in Lund studies in geography. The Royal University of Lund – Gleerup Publishers, 1962.
- [BW02] D. Badariotti and C. Weber. La mobilité résidentielle en ville. modélisation par automates cellulaires et système multi-agents à Bogota. *L’Espace géographique*, (2) :97–108, 2002.
- [C⁺07] Nadine Cattan et al. *Cities and networks in Europe : a critical approach of polycentrism*. John Libbey Eurotext, 2007.
- [Cal07] Benoît Calvez. *Le calibrage de modèles à base d’agents pour la simulation de systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université d’Evry Val d’Essonne, 2007.
- [Cam94] Christophe Cambier. *SIMDELTA un système multi-agents pour simuler la pêche sur le delta central du Niger*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1994.
- [Car97] J. Carn. Sim city : aménager un milieu urbain au cm2. IUFM de Caen, 1997.
- [Cas97] John L. Casti. *Reality rules : picturing the world in mathematics*. Wiley-Interscience, 1997.
- [CC06] Christian Castle and Andrew Crooks. Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations. Working Paper 106, Centre for Advanced Spatial Analysis, September 2006.
- [CDP96] Anne Collinot, Alexis Drogoul, and L. Ploix. *Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents*, chapter Application de la méthode Cassiopée à l’organisation d’une équipe de robots, pages 136–152. Hermès, 1996.
- [CH05] Benoît Calvez and Guillaume Hutzler. Automatic tuning of agent-based models using genetic algorithms. In *Proceedings of the 6th International Workshop on Multi-Agent Based Simulation (MABS’05)*, 2005.
- [Cha65] F.S. Chapin. A model for simulating residential development. *Journal of the American Planning Association*, 31(2) :120–125, May 1965.

- [Chr33] Walter Christaller. *Die zentralen Orte in Süddeutschland : eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*. Iena, 1933.
- [CL00] Christophe Claramunt and Sylvie Lardon, editors. *Revue internationale de Géomatique, numéro « SIG et simulations »*, volume 10. Hermès Sciences, 2000.
- [CL09] Brad Cox and Tom Love. *Masterminds of Programming. Conversations with the creators of major programming languages*, chapter Objective-C, pages 241–275. O'Reilly, 2009.
- [Con70] J. Conway. The game of life. *Scientific American*, 223 :120–123, 1970.
- [Cou85] Helen Couclelis. Cellular worlds : a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and Planning A*, 17(5) :585–596, 1985.
- [CPR10] Florence Curie, Julien Perret, and Anne Ruas. Simulation of urban blocks densification. In *13th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Guimarães, Portugal, 2010. available online at http://agile2010.dsi.uminho.pt/pen/ShortPapers_PDF%5C132_D0C.pdf.
- [CPRSJ94] Nadine Cattan, Denise Pumain, Céline Rozenblat, and Thérèse Saint-Julien. *Le système des villes européennes*. Anthropos, Economica, 1994.
- [CR86] C. Cauvin and H. Reymond. *Nouvelles méthodes en cartographie*. GIP Reclus, Maison de la Géographie, 1986.
- [Cro10] Andrew Crooks. Constructing and implementing an agent-based model of residential segregation through vector gis. *Journal of Geographical Information Science*, 24(5) :661–675, 2010.
- [CW68] F. S. Chapin and S. F. Weiss. A probabilistic model for residential growth. *Transportation research*, 2 :375–390, 1968.
- [Dau05] Eric Daudé. Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une géographie artificielle. In Yves Guermond, editor, *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*, pages 355–382. Hermès, 2005.
- [Dav02] Paul Davidsson. Agent based social simulation : A computer science view. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1), 2002.
- [DCW64] Thomas G. Donnelly, F. Stuart Chapin, and Shirley F. Weiss. A probabilistic model for residential growth. an urban studies research monograph. Technical report, Center for Urban and Regional Studies, Institute for Research in Social Science, University of North Carolina, 1964.
- [DD01] François Durand-Dastès. *Modèles en analyse spatiale*, chapter Les concepts de la modélisation spatiale, pages 31–59. Hermès Science Publications, 2001.
- [Del08] François Delisle. Accessibilité et morphologie urbaine en europe et aux etats-unis. Master's thesis, Université Paris 1, 2008.
- [Des10] Alain Desrosières. *La politique des grands nombres. Histoire de la raison statistique*. La Découverte Poche / Sciences humaines et sociales. La Découverte, 2010. première édition 1993 chez Lavoisier (épuisée).
- [DLBPV84] Tomás De La Barra, B. Pérez, and N. Vera. TRANUS-J : putting large models into small computers. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 11(1) :87–101, 1984.

- [DLNL08] Matthieu Delage, Florent Le Néchet, and Thomas Louail. Accessim : modélisation et simulation d'accessibilité et d'inégalités géographiques dans la ville. *Mappe-monde*, 92(4), décembre 2008. second prix du concours de géovisualisation du festival de Saint-Dié.
- [DLNL⁺09] Matthieu Delage, Florent Le Néchet, Thomas Louail, Hélène Mathian, and Sébastien Rey. Simulation d'accessibilité dans la ville et expérience pédagogique : le modèle accessim. In *Actes des neuvièmes rencontres de ThéoQuant*, 2009. librement accessible en ligne à <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/fr/index.php?menu=accueil>.
- [DLPBB03] P. D'Aquino, C. Le Page, F. Bousquet, and A. Bah. Using self-designed role-playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management : The SelfCormas experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3), 2003.
- [Doc06] Apple Developer Documentation. The objective-c programming language. Technical report, Apple Computer, 2006.
- [DPGL03] Edwige Dubos-Paillard, Yves Guermond, and Patrice Langlois. Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire. le modèle spacelle. *L'Espace géographique*, 12(4) :357–378, 2003.
- [Dro93] Alexis Drogoul. *De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1993.
- [Dro00] Alexis Drogoul. *Systèmes multi-agents situés*. Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 6, 2000.
- [Dun03] Andrew M. Duncan. *Objective-C*. O'reilly, 2003.
- [Dur99] F. Dureau. Les mobilités à géométrie variable des habitants de Bogota. *Espace, Populations, Sociétés*, 2 :329–344, 1999.
- [DVM02] Alexis Drogoul, Diane Vanbergue, and Thomas Meurisse. Multi-agent based simulation : Where are the agents ? In Jaime S. Sichman, Francois Bousquet, and Paul Davidsson, editors, *Multi-Agent-Based Simulation II. Third International Workshop, MABS 2002*, volume 2581 of *Lecture Notes in Computer Science*, Bologna, Italy, July 15-16 2002. Springer.
- [EA96] Joshua M. Epstein and Robert L. Axtell. *Growing artificial societies : social science from the bottom-up*. M.I.T. Press, 1996.
- [EFSDDB09] Amal El Fallah Seghrouchni, Jürgen Dix, Mehdi Dastani, and Rafael H. Bordini, editors. *Multi-Agent Programming :Languages, Tools and Applications*. Springer, 2009.
- [EH03] Bruce Edmonds and David Hales. Replication, replication and replication : Some hard lessons from model alignment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4), 2003. available at <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/11.html>.
- [F⁺71] Jay W. Forrester et al. *World dynamics*. Wright-Allen Press Cambridge, MA, 1971.
- [Fav07] Jean-Marc Favaro. *Croissance urbaine et cycles d'innovation dans les systèmes de villes : une modélisation par les interactions spatiales*. Thèse de doctorat, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, 2007.
- [Fer95] Jacques Ferber. *Les systèmes multi-agents*. InterEditions, 1995.

- [Fer07] Jacques Ferber. Multi-agent concepts and methodologies. In Frédéric Amblard and Denis Phan, editors, *Agent-based modelling and simulation in the social and human sciences*. The Bardwell Press, Oxford, 2007.
- [Fer09] Jacques Ferber. Vers un modèle multi-agent de construction d'ontologies. In Denis Phan, editor, *16èmes rencontres de Rochebrune : Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires*, 2009. en ligne à <http://gemas.msh-paris.fr/dphan/rochebrune09/communications.htm>.
- [Fey80] Richard Feynman. *La nature de la physique*. Points, Collection Sciences. Seuil, 1980.
- [FGM04] Jacques Ferber, Olivier Gutknecht, and Fabien Michel. From agents to organizations : An organizational view of multi-agent systems. In P. Giorgini, J.-P. Müller, and J. Odell, editors, *Agent-oriented software engineering (AOSE) 2003*, volume LNCS 2935, pages 443–459, Berlin, Heidelberg, 2004. Springer-Verlag.
- [FKV01] Masahisa Fujita, Paul Krugman, and Anthony Venables. *The spatial economy : cities, regions and international trade*. The MIT press, 2001.
- [For69] Jay W. Forrester. *Urban Dynamics*. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1969. Economica, 1979, pour l'ed. française.
- [FP01] Pierre Frankhauser and Denise Pumain. *Modèles en analyse spatiale*, chapter Fractales et géographie, pages 301–329. Hermès, 2001.
- [Fra94] Pierre Frankhauser. *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos, Economica, Paris, 1994.
- [FT97] Masahisa Fujita and Jacques-François Thisse. Economie géographique, problèmes anciens et nouvelles perspectives. *Annales d'Economie et de Statistique*, 45 :37–87, 1997.
- [FW61] Jay W. Forrester and J. Wright. *Industrial dynamics*. MIT press Cambridge, MA, 1961.
- [Gay70] Marvin Gaye. *What's going on ?*, chapter Inner city blues, page 9. Tamla Motown, 1970.
- [GB⁺00] Peter Gould, Antoine Bailly, et al. *Mémoires de géographes*. Anthropos ; Economica, 2000.
- [GDH05] Jacques Gignoux, Ian Davies, and David Hill. 3worlds : a new platform for simulating ecological systems. In *1st Open Inter. Conf. on Modelling and Simulation*, pages 49–64, Clermont-Ferrand, 2005.
- [GF98] Olivier Gutknecht and Jacques Ferber. Un méta-modèle organisationnel pour l'analyse, la conception et l'exécution de systèmes multi-agents. In *JFIADSMA '98*, pages 267–280. Hermès, 1998.
- [GF00] Olivier Gutknecht and Jacques Ferber. Madkit : a generic multi-agent platform. In *Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*, page 79. ACM, 2000.
- [GG97] Cynthia Ghorra-Gobin. *Los Angeles : le mythe américain inachevé*. CNRS Editions, 1997.
- [GG98] Cynthia Ghorra-Gobin. *La ville américaine*. Nathan Université, 1998.
- [GGG⁺08] N. Gaud, S. Galland, F. Gechter, V. Hilaire, and A. Koukam. Holonic multilevel simulation of complex systems : Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(10) :1659–1676, 2008.

- [Gib31] Robert Gibrat. *Les Inégalités économiques, applications : aux inégalités des richesses, à la concentration des entreprises, aux populations des villes, aux statistiques des familles, etc. : d'une loi nouvelle, la loi de l'effet proportionnel*. Librairie du Recueil Sirey, 1931.
- [Gil77] Daniel T. Gillespie. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. *The Journal of Physical Chemistry*, 81(25) :2340–2361, 1977.
- [GK04] Edward L. Glaeser and Matthew E. Kahn. *Handbook of Regional and Urban Economics*, chapter Sprawl and urban growth, pages 2481–2527. Elsevier B.V., 2004.
- [Gli07] Benoît Glisse. *Exploration scientifique par la conception collaborative de systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2007.
- [GM01] Jean-Louis Giavitto and Olivier Michel. MGS : a programming language for the transformations of topological collections. Technical Report 61-2001, LaMI – Université d'Évry Val d'Essonne, May 2001.
- [GM06] Vincent Ginot and Hervé Monod. *Modélisation et simulation multi-agents*, chapter Explorer les modèles par simulation : application aux analyses de sensibilité, pages 75–102. Hermès Science Publications, 2006.
- [GOA00] C. C. Gibson, E. Ostrom, and T. K. Ahn. The concept of scale and the human dimensions of global change : a survey. *Ecological Economics*, 32(2) :217–239, 2000.
- [Gos84] R. Gosper. Exploiting regularities in large cellular spaces. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 10 :75–80, 1984.
- [GP93] France Guérin-Pace. *Deux siècles de croissance urbaine*. collection Villes. Anthropos-Economica, Paris, 1993.
- [GQ07] Javier Gil-Quijano. *Modèles d'auto-organisation pour l'émergence de formes urbaines à partir de comportements individuels à Bogota*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2007.
- [GQHL09] Javier Gil-Quijano, Guillaume Hutzler, and Thomas Louail. De la cellule biologique à la cellule urbaine : retour sur trois expériences de modélisation multi-échelles à base d'agents. In Zahia Guessoum and Salima Hassas, editors, *JFSMA'09 Lyon Systèmes multi-agents, Génie logiciel multi-agent*. Editions Cepaduès, 2009.
- [GQHL10] Javier Gil-Quijano, Guillaume Hutzler, and Thomas Louail. Accroche-toi au niveau, j'enlève l'échelle – éléments d'analyse des aspects multi-niveaux dans la simulation à base d'agents. *Revue d'intelligence artificielle*, 24(4), 2010. à paraître.
- [GQP07] Javier Gil Gil-Quijano and Marie Piron. Formation automatique de groupes d'agents sociaux par techniques d'apprentissage non supervisé. In *Actes de EGC'07 Atelier Fouille de Données et Algorithmes Biomimétiques*, Namur Belgique, 23 Janvier 2007.
- [GQPD07a] Javier Gil-Quijano, Marie Piron, and Alexis Drogoul. *Social Simulation : Technologies, Advances and New Discoveries*, chapter Mechanisms of automated formation and evolution of social-groups : A multi-agent system to model the intra-urban mobilities of Bogotá city, pages 151–168. Idea Group Inc., 2007.
- [GQPD07b] Javier Gil-Quijano, Marie Piron, and Alexis Drogoul. Vers une simulation multi-agent de groupes d'individus pour modéliser les mobilités résidentielles intra-urbaines. *Revue internationale de géomatique*, 17 :161–181, 2007.

- [GS08a] Jean-Louis Giavitto and Antoine Spicher. *Systems Self-Assembly : multidisciplinary snapshots*, chapter Simulation of self-assembly processes using abstract reduction systems, pages 199–223. Elsevier, 2008. doi :10.1016/S1571-0831(07)00009-3.
- [GS08b] Jean-Louis Giavitto and Antoine Spicher. Topological rewriting and the geometrization of programming. *Physica D*, 237(9) :1302–1314, jully 2008.
- [GT05a] Nigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch. *Simulation for the social scientist*. Open University Press, 2005.
- [GT05b] Nigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch. *Simulation for the social scientist*, chapter Multilevel simulation models, pages 100–129. Open University Press, 2005.
- [Gue05] Yves Guermond. *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*, chapter Des modèles classiques à la modélisation incrémentale. Lavoisier, Hermès Sciences, 2005.
- [Ha06] P. Haas and ali. Housing and transportation cost trade-offs and burdens of working households in 28 metros (available online at <http://www.cnt.org>). Technical report, Center for Neighborhood Technology, 2006.
- [Hag65] Peter Haggett. *Locational analysis in modern geography*. Arnold, Londres, 1965.
- [Har69] David Harvey. *Explanation in geography*. Edward Arnold, 1969.
- [Hoc] Yves Hochet. La saga simcity en sixième. archives du CNDP, available online at <http://en.wikipedia.org/wiki/SimCity>.
- [HS01] Einar Holm and Lena Sanders. *Modèles en analyse spatiale*, chapter Modèles spatiaux de microsimulation, pages 187–217. Lavoisier, Hermès, 2001.
- [Hum90] W.S. Humphrey. *Managing the software process*. Addison-Wesley, New York, 1990.
- [Hut10] Guillaume Hutzler. *Le Has(Art) et la Néce(Cité). Une approche (auto-)poïétique des systèmes complexe*. Thèse d’habilitation à diriger des recherches, Université d’Evry-Val d’Esonne, 2010.
- [Häg53] Torsten Hägerstrand. *Innovation diffusion as a spatial process*. University of Chicago Press, 1953.
- [Häg67] Torsten Hägerstrand. *Innovation diffusion as a spatial process*. University of Chicago Press Chicago, 1967.
- [Häg87] Torsten Hägerstrand. *Transportation planning in a changing world*, chapter Human interaction and spatial mobility : retrospect and prospect, pages 11–28. Aldershot, Grower, 1987.
- [JDLB00] R.A. Johnston and Tomas De La Barra. Comprehensive regional modeling for long-range planning : linking integrated urban models and geographic information systems. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 34(2) :125–136, 2000.
- [Jen00] Nick R. Jennings. On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, 117(2) :277–296, 2000.
- [Jol04] Thierry Joliveau. Géomatique et gestion environnementale du territoire. recherches sur un usage géographique des sig. Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences Humaines, Université de Rouen, 2004. 2 vol. 504 p. + non pag., accessible à <http://thierry.joliveau.pagesperso-orange.fr/HDR.html>.
- [KGR05] Timothy A. Kohler, George J. Gumerman, and Robert Reynolds. Simulating ancient societies : Computer modeling is helping to unravel the archaeological mysteries of the american southwest. *Scientific American*, pages 77–84, July 2005.

- [Lan05] Patrice Langlois. *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*, chapter Les automates cellulaires pour la modélisation des systèmes spatiaux. Traité IGAT, série Aménagement et gestion du territoire. Hermès, 2005.
- [Lan09] Patrice Langlois. Une ontologie formelle pour la modélisation de systèmes complexes en géographie : le modèle aoc. In Denis Phan, editor, *16èmes rencontres de Rochebrune : Ontologie et dynamique des systèmes complexes, perspectives interdisciplinaires*, 2009. accessible à <http://www.gemas.fr/dphan/rochebrune09/papiers/LangloisPatrice.pdf>.
- [LBG⁺] Thomas Louail, Anne Bretagnolle, Jean-Louis Giavitto, Guillaume Hutzler, Jean Laterrasse, and Denise Pumain. De la géométrie des réseaux viaires à l'organisation spatiale intra-urbaine. 2ème session des Journées thématiques R2DS : "La métropolisation face aux défis du développement soutenable". Maison de la Recherche, 9 mars 2010.
- [LDLN⁺] Thomas Louail, Matthieu Delage, Florent Le Néchet, Hélène Mathian, and Sébastien Rey. Accessim : Simulation of accessibility in urban settings and experiments in teaching applications. MAPS2 conference, "Teaching of/with Agent-Based Models in the Social Sciences", ENS Paris, April 8-9th 2010.
- [Lee73] D.B. Lee. A requiem for large scale modeling. *Journal of The American Institute of Planners*, 39(3) :163–178, 1973.
- [Les09] A. Lesne. Biologie des systèmes : l'organisation multiéchelle des systèmes vivants. *Medecine Sciences*, 25 :585–587, 2009.
- [LH09] J. Lepagnot and G. Hutzler. A multi-scale agent-based model for the simulation of avascular tumor growth. *Jour. of Biol. Phys. and Chem.*, 9 :17–25, March 2009.
- [Liv06] Pierre Livet. Essai d'épistémologie de la simulation multi-agents en sciences sociales. In Frédéric Amblard and Denis Phan, editors, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, chapter 8, pages 193–218. Hermès, 2006.
- [LM09] Jean Laterrasse and Olivier Morellet. Mobilités et formes urbaines : difficultés d'analyse, éléments de connaissance et bonnes pratiques. In *Energie, mobilité, formes urbaines et organisation de l'espace. Séminaire de l'O.I.P.R n°90.*, 2009.
- [Lou] Thomas Louail. Modeling multi-scale urban dynamics with multi-agent models : an application to the comparison of the european and us urban systems through simulation. Rencontres annuelles des doctorants du laboratoire IBISC, Evry, avril 2008.
- [Lou07] Thomas Louail. A multi-level mas to compare us and european systems of cities. ASU, ISCOM final workshop, Phoenix, january 2007.
- [Lou08a] Thomas Louail. Can geometry explain socio-economical differences between us and european cities? Agent Based Spatial Simulation workshop (slides available at <http://s4.csregistry.org/ABS2>), Institut des Systèmes Complexes, Paris, 24-25 Novembre 2008, Novembre, 24-25 2008.
- [Lou08b] Thomas Louail. Computer modeling of multi-scale urban dynamics with multi-agent models. S4 network modeling tour, Aix-en-Provence, Janvier 2008, January 2008.
- [Lou09] Thomas Louail. De la géométrie des réseaux viaires à l'organisation spatiale intra-urbaine. *Revue internationale de Géomatique*, 19(4) :443–469, Décembre 2009.

- [Low64] Ira S. Lowry. *A Model of Metropolis*. RAND Corporation, 1964.
- [LP97] Langlois and Phipps. *Automates cellulaires - Application à la simulation urbaines*. Hermès, 1997.
- [LS07] Thomas Louail and Lena Sanders. Multi-agent systems, an introduction. workshop session : Netlogo simulation activities. Ecole thématique CNRS "Les dynamiques spatio-temporelles en archéologie" organisée par le réseau ISA, Tours, 25-29 juin 2007, Juin 2007.
- [LZ98] J. Landis and M. Zhang. The second generation of the California urban futures model. Part 1 : Model logic and theory. *Environment and Planning B*, 25 :657–666, 1998.
- [MAB⁺98] Hernan Makse, Jose Andrade, Michael Batty, Shlomo Havlin, and H. Stanley. Modeling urban growth patterns with correlated percolation. *Physical Review E*, 58(6) :7054–7062, 1998.
- [Man04] David Mangin. *La ville franchisée*. Editions de la Villette, 2004.
- [Mar06] Nicolas Marilleau. *Méthodologie, formalismes et outils de modélisation-simulation pour l'étude des systèmes complexes : application à la mobilité géographique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2006.
- [Mat03] Philippe Mathis, editor. *Graphes et réseaux. Modélisation multiniveau*. Hermès, 2003.
- [MBLA96] Nelson Minar, Roger Burkhart, Chris Langton, and Manor Askenazi. The swarm simulation system : a toolkit for building multi-agent simulation. Technical report, Santa Fe Institute, 1996.
- [MCD⁺08] Nicolas Marilleau, Christophe Cambier, Alexis Drogoul, Jean-Luc Chotte, Edith Perrier, and Eric Blanchart. Environnement multi-échelles à base de fractales pour la modélisation agent d'écosystèmes. In René Mandiau and Pierre Chevaillier, editors, *Journées francophones sur les systèmes multi-agents : Communautés virtuelles et naturelles - Actes des JFSMA'08*. Cépaduès, 2008.
- [ME93] François Moriconi-Ebrard. *L'urbanisation du monde*. Collection Villes. Anthropos, Economica, 1993.
- [ME94] François Moriconi-Ebrard. *GEOPOLIS - Pour comparer les villes du monde*. Collection Villes. Anthropos, Economica, 1994.
- [Mer90] M. Mercier. L'apprentissage de la théorie des lieux centraux. *L'information géographique*, 54 :32–40, 1990.
- [Meu04] Thomas Meurisse. *Simulation multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2004.
- [MGM⁺06] F. Maquerlot, S. Galiacy, M. Malo, C. Guignabert, D. A. Lawrence, M.-P. d'Ortho, and G. Barlovatz-Meimon. Dual role for plasminogen activator inhibitor type 1 as soluble and as matricellular regulator of epithelial alveolar cell wound healing. *Am. J. Pathol.*, 169 :1624–1632, 2006.
- [Mon08] Thomas Moncion. *Modélisation de la complexité et de la dynamique des simulations multi-agents. Application pour l'analyse des phénomènes émergents*. Thèse de doctorat, Université d'Evry, 2008.
- [Mon09] Alexandre Monzie. Interfacage algorithmes de calibrage de systèmes multi-agents - simulateur. Technical report, ENSIIE, IBISC, 2009.

- [PLBGB00] Thierry Paquot, Michel Lussault, Sophie Body-Gendrot, and Claude Bartolone. *La ville et l'urbain, l'état des savoirs*. Découverte, Paris, 2000.
- [PPK06] Denise Pumain, Thierry Paquot, and Richard Kleinschmager. *Dictionnaire, la ville et l'urbain*. Economica : Anthropos, Paris, 2006.
- [PPVM09] Denise Pumain, Fabien Paulus, and Céline Vacchiani-Marcuzzo. Innovation cycles and urban dynamics. In D. Lane, S. Van der Leeuw, D. Pumain, and G. West, editors, *Complexity perspectives in innovation and social change*, volume 7 of *Methodos Series*, chapter 8. Springer, 2009.
- [PSB⁺09] Denise Pumain, Lena Sanders, Anne Bretagnolle, Benoît Glisse, and Hélène Mathian. The future of urban systems. In D. Lane, D. Pumain, S. Van der Leeuw, and G. West, editors, *Complexity perspectives on innovation and social change*, Methodos Series, chapter 12. Springer, 2009.
- [PSJS89] Denise Pumain, Thérèse Saint-Julien, and Lena Sanders. *Villes et auto-organisation*. Economica, Paris, 1989.
- [Pum82] Denise Pumain. *La dynamique des villes*. Economica, Paris, 1982.
- [Pum97] Denise Pumain. Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 2 :119–134, 1997.
- [Pum98] Denise Pumain. Urban research and complexity. In C.S Bertuglia, G. Bianchi, and A. Mela, editors, *The City and its Sciences*, pages 323–361. Physica Verlag, 1998.
- [Pum04] Denise Pumain. Scaling laws and urban systems. *Santa Fe Institute, Working Paper*, 04-02-002 :26, 2004.
- [Pum06a] Denise Pumain, editor. *Hierarchy in natural and social sciences*, volume 3 of *Methodos Series*. Springer, 2006.
- [Pum06b] Denise Pumain. Systèmes de villes et niveaux d'organisation. In Paul Bourguin and Annick Lesne, editors, *Morphogenèse. L'origine des formes.*, pages 239–263. Belin, 2006.
- [RCVMD09] S. Rosière, K. Cox, C. Vacchiani-Marcuzzo, and C. Dahlman. *Penser l'espace politique*. Ellipses, Paris, 2009.
- [Res94] Mitchel Resnick. *Turtles, termites and traffic Jams : explorations in massively parallel microworlds*. MIT Press, 1994.
- [Res96] Mitchel Resnick. Beyond the centralized mindset. *Journal of the Learning Sciences*, 5(1) :1–22, 1996.
- [Rey09] Sébastien Rey. Conception d'une plateforme prototype pour le couplage de modules d'exploitation de données produites par un modèle de simulation urbaine (simpop2). Master's thesis, M2 CarthaGeo Pro, Universités Paris 1- Paris 7 - ENSG, 2009.
- [Rig06] W. Riggs. Agent-based modeling as constructionist pedagogy : An alternative teaching strategy for the social sciences. In T. Reeves and S. Yamashita, editors, *Proceedings of World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education*, pages 1417–1423, Honolulu, Hawaii, USA, October 2006. AACE, AACE.
- [RLJ06] S. F. Railsback, S. L. Lytinen, and S. K. Jackson. Agent-based simulation platforms : review and development recommendations. *Simulation*, 82 :609–623, 2006.

- [Rob95] Marie-Claire Robic. Epistémologie de la géographie. In Antoine Bailly, Robert Ferras, and Denise Pumain, editors, *Encyclopédie de géographie*, pages 37–55. Economica, Paris, 2 edition, 1995.
- [San84] Lena Sanders. *Interaction spatiale et modélisation dynamique ; une application au système intraurbain*. Thèse de doctorat, Université Paris 7, 1984.
- [San92] Lena Sanders. *Systèmes de villes et synergie*. Anthropos, Economica, 1992.
- [San06] Lena Sanders. Les modèles agents en géographie urbaine. In Frédéric Amblard and Denis Phan, editors, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, chapter 7, pages 173–192. Hermès, 2006.
- [San07] Lena Sanders. Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie. *Revue internationale de géomatique*, 17 :135–160, 2007.
- [Saned] Lena Sanders. Géographie quantitative et analyse spatiale : quelles formes de scientificités ? In Th. Martin, editor, *La scientificité des Sciences Humaines et Sociales*, Philosophie des sciences. Vuibert, to be published.
- [Sap06] Gilbert Saporta. *Probabilités, analyse de données et statistiques (2ème édition)*, chapter Méthodes algorithmiques, choix de modèles et principe d'apprentissage, pages 487–510. Editions Technip, 2006.
- [Sar79] Robert G. Sargent. Validation of simulation models. In *Proc. 1979 Winter Simulation Conf.*, 1979.
- [Sch53] Fred K. Schaefer. Exceptionalism in geography : A methodological examination. *Annals of the Association of American Geographers*, 43(3) :226–249, 1953.
- [Sch08] Clara Schmitt. Expérimentations pour la validation d'un modèle multi-agent : l'exemple de simpop2 appliqué à l'évolution des villes d'europe géo-référencées. Master's thesis, Ecole Nationale d'Horticulture et D'Aménagement du Paysage, 2008.
- [SFG⁺06] Lena Sanders, Jean-Marc Favaro, Benoît Glisse, Hélène Mathian, and Denise Pumain. Dynamics of the european urban network. final report in the framework of the european program "time-geographical approaches to emergence and sustainable societies". Technical report, UMR Géographie-Cités - LIP6, 2006.
- [SFM⁺05] Lena Sanders, Jean-Marc Favaro, Hélène Mathian, Denise Pumain, and Benoît Glisse. Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle eurosims. *Cybergeog*, (392), 2005.
- [SM08] Lena Sanders and Hélène Mathian. Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents. In Denis Phan, editor, *15èmes Journées de Rochebrune : expérimentation et systèmes complexes*, 2008. accessible en ligne à <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00258667/>.
- [SPM⁺97] Lena Sanders, Denise Pumain, Hélène Mathian, France Guérin-Pace, and Stephane Bura. Simpop : a multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 24(2) :287–305, 1997.
- [SPTD98] David Servat, Edith Perrier, Jean-Pierre Treuil, and Alexis Drogoul. When agents emerge from agents : Introducing multi-scale viewpoints in multi-agent simulations. In J.S Sichman, R. Conte, and N. Gilbert, editors, *MABS*, volume 1534 of *LNCS*, pages 183–198. Springer, 1998.

- [TDZ08] Jean-Pierre Treuil, Alexis Drogoul, and Jean-Daniel Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents*. Dunod, 2008.
- [The02] Thomas Thevenin. *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains : une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisonline*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2002.
- [TMPP01] Jean-Pierre Treuil, Christian Mullon, Edith Perrier, and Marie Piron. *Modèles en analyse spatiale*, chapter Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées, pages 219–252. Hermès, 2001.
- [Tob70] Waldo Tobler. A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic Geography*, 46(2) :234–240, 1970.
- [Tob79] Waldo Tobler. Cellular geography. In S. Gale and G. Olsson, editors, *Philosophy in Geography*, pages 379–386. Reidel Publishing Company, 1979.
- [TRC84] H. Tardieu, A. Rochfeld, and R. Colletti. *La méthode MERISE : principes et outils*. Les Éditions d'Organisation, 1984.
- [Ull41] Edward L. Ullman. A theory of location for cities. *American Journal of Sociology*, 46(6) :853–864, 1941.
- [Ull80] Edward L. Ullman. *Geography as spatial interaction*. University of Washington Press, 1980.
- [vAB08] Pek van Andel and Danièle Bourcier. *De la sérendipité dans la science, la technique, l'art et le droit : Leçons de l'inattendu*. L'Act Mem, 2008.
- [Van03] Diane Vanbergue. *Conception de simulation multi-agents : application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota*. Thèse de doctorat, Université Paris 6, 2003.
- [Var07] Franck Varenne. *Du modèle à la simulation informatique*. Vrin, 2007.
- [Var10] Franck Varenne. Les simulations computationnelles en sciences sociales. *NPSS. Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 5(2) :17–49, 2010.
- [VP06] Franck Varenne and Denis Phan. *Modélisation et simulation multi-agents : applications aux Sciences de l'Homme et de la Société*, chapter Epistémologie dans une coquille de noix : concevoir et expérimenter, pages 104–119. Hermès-Sciences, 2006.
- [VT26] Johann Heinrich Von Thünen. *Der isolierte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie*. F. Perthes, Hamburg, 1826.
- [Wal77] Bernard Walliser. *Systèmes et modèles*. Seuil, 1977.
- [WBN⁺03] Paul Waddell, Alan Borning, Michael Noth, Nathan Freier, Michael Becke, and Gudmundur Ulfarsson. Microsimulation of urban development and location choices : design and implementation of urbansim. *Networks and Spatial Economics*, 3(1) :43–67, 2003.
- [WE93] Roger White and Guy Engelen. Cellular automata and fractal urban form : A cellular modeling approach to the evolution of urban land use patterns. *Environment and Planning A*, 25 :1175–1199, 1993.
- [WEU97] Roger White, Guy Engelen, and I. Uljee. The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B - Planning and Design*, 24(3) :323–343, 1997.

- [Wik10a] Wikipedia. Hashlife — wikipedia, the free encyclopedia. 2010. [Online ; accessed 12-August-2010].
- [Wik10b] Wikipédia. Simcity — wikipédia, l'encyclopédie libre. 2010. [En ligne ; Page disponible le 13-septembre-2010].
- [Wil81] Alan G. Wilson. *Catastrophe theory and bifurcation : applications to urban and regional systems*. Croom Helm Ltd. University of California Press, 1981.

Table des matières du document