



Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet

Clara Schmitt

► To cite this version:

Clara Schmitt. Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet. Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2014. Français. NNT : 2014PA010511 . tel-01077891

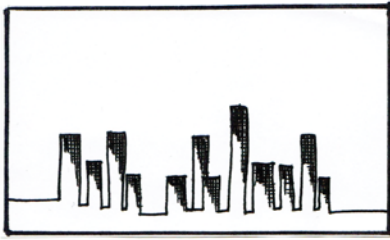
HAL Id: tel-01077891

<https://theses.hal.science/tel-01077891>

Submitted on 27 Oct 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

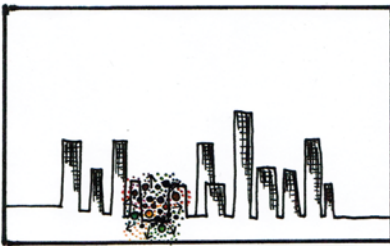
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne
Ecole Doctorale de Géographie de Paris



Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet



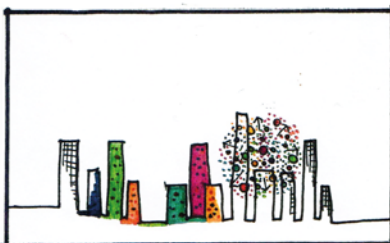
Clara Schmitt



Thèse de doctorat

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Paris 1 en géographie,
présentée et soutenue publiquement le 28 février 2014

Sous la direction de Denise Pumain



Membres du Jury :

Guillaume DEFFUANT, Directeur de recherche IRSTEA (Rapporteur)
Isabelle THOMAS, Professeur, Université Catholique de Louvain (Rapporteur)
Arnaud BANOS, Directeur de recherche CNRS (Examineur)
Pierre GARMY, Conservateur du patrimoine HDR (Examineur)
Anne GRENIER, Animateur de recherche à l'ADEME (Examineur)
Sander van der LEEUW, Professeur, Arizona State University (Examineur)
Denise PUMAIN, Professeur, Université Paris 1 (Directeur de thèse)



*A mon père,
qui aurait été fier de lire cette thèse*

un grand Merci

À Mesdames Isabelle Thomas et Anne Grenier, Messieurs Guillaume Deffuant, Pierre Garmy et Sander van der Leeuw pour m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse.

À Denise, la directrice de thèse idéale, à qui je dois beaucoup. Elle a su comment me stimuler et me soutenir pour que je puisse donner le meilleur de moi-même. Elle m'a aussi donné les conditions rêvées pour entrer dans le monde de la recherche.

À Arnaud, qui a parfois, un peu, beaucoup, plus raison que moi sur deux, trois petits points (même si je ne l'avouerai jamais devant lui) et que j'ai si bien fait d'écouter tout au long de ce parcours de thèse (ou la plupart du temps).

À mes complices de recherche :

Sébastien, *compadre* de thèse, un *Tac* de choc pour un duo qui dépote ;

Romain, qui scale tout et au-delà, ce qui nous a permis de réaliser l'imaginable même dans nos rêves de recherches les plus fous ;

Robin, qu'on a converti à la recherche et qui maintenant, devenu mi-hérisson mi-dauphin, nous est à tous indispensable ;

Marion, avec qui les oscillations entre procrastination efficace et travail intense sont entrées en phase ;

Clémentine, pour l'esthétique de la recherche et la recherche de l'esthétique ;

Matthieu, l'ouvrier charpentier d'OpenMole ou le salarié du calcul libre ?

Paul, qui me fait des nœuds au cerveau mais qui m'aide aussi à les démêler.

À l'Ademe et à l'ERC GeoDiverCity, pour des financements grand luxe, avec toutes les options.

Au laboratoire Géographie-Cités et à l'ISC-PIF, à France Grille et à la grille Géomed qui ont très gentiment accepté qu'on les colonise peu à peu (et parfois à leur insu).

À tous les membres de l'ANR TransMondyn et à ceux de l'ERC GeoDiverCity, pour tous les échanges collectifs et personnels que ces rencontres ont provoqué et qui ont donné sens à mon travail de thèse.

À toutes les personnes du laboratoire Géographie-Cités qui rendent ce cadre de travail exceptionnel :

Léna, Anne et Hélène, qui ont toujours accepté que je vienne les embêter, et qui m'ont tant aidé ces dernières années ;

Saber, Martine, et Véronique dont on ne facilite pas le travail mais qui pourtant nous facilitent la vie tous les jours ;

Et bien sur à tout le *Oven-street Crew* (*always fresh !*) et ses lamibos, que d'heures gagnées (ou bien occupées) grâce à eux : Séb, Romain, Marion, Robin, Clémentine, Paul, Hadri, Mathieu, Solène, Zoé, Brenda, Sylvestre, Olivier, Thomas, Mathieu, Florent, Sylvain, Pierre, Charlène, Caroline, Julie, Julie... et à tous ceux que j'oublie de manière si ingrate !

Mention spéciale à Olivier, Clémentine, Marion, Robin, Zoé, Paul, Axelle, Marion, Elena, Pamela et Laurène qui ont débogué chaque phrase de ce manuscrit (et oui, il fallait bien tout ce monde !)

Au soutien inconditionnel de l'A.C.D.C., sur lequel je m'appuie depuis déjà plus de dix ans et sur lequel je vais encore m'appuyer pour les siècles des siècles.

À ma mère et à ma sœur, pour tout, bien sûr !

Et puis à Manu, mon cher et tendre, qui m'a subi, soutenu et conseillé. Il a vécu cette thèse de si près qu'elle est un peu devenue la sienne aussi.

Table des matières

INTRODUCTION	21
1 La dynamique des villes : de grandes régularités à expliquer	31
1.1 La hiérarchie et la spatialisation du système de peuplement	36
1.1.1 Distributions statistiques des tailles de centres de peuplement . . .	36
1.1.2 Des interprétations pour cette structure des systèmes de peuplement fortement hiérarchisée	40
1.1.3 Un processus de hiérarchisation croissante	42
1.1.4 La répartition spatiale des centres de peuplement	45
1.2 Les interactions spatiales urbaines	48
1.2.1 Modélisation des échanges entre les villes par les effets de la distance et de la taille : le modèle gravitaire	48
1.2.2 Les modèles de situation : le potentiel	51
1.2.3 La diffusion des innovations	51
1.2.4 Les interactions dans la dynamique des villes	53
1.3 Les innovations et la complexification urbaine	56
1.3.1 Les lois d'échelle dans le système de villes	56
1.3.2 Les cycles d'innovation et la complexification des fonctions urbaines	58
1.3.3 La taille démographique d'une ville comme marqueur de sa complexité	63

1.3.4	Auto-catalyse de l'innovation et de l'urbanisation	65
1.3.5	Innovations dans les transports : Les effets de la contraction de l'espace-temps sur le système de villes	65
1.4	Le processus d'urbanisation	68
1.4.1	Une urbanisation croissante marquée par deux grandes inflexions . .	68
1.4.2	Deux régimes de dynamiques urbaines	73
1.4.2.1	Un régime de dynamique des centres de peuplement à croissance fortement contrainte par les conditions locales .	74
1.4.2.2	Un régime de dynamique à croissance rapide et libérée des contraintes locales	77
1.5	Des faits stylisés à unifier au sein d'une théorie urbaine	79
1.5.1	Les faits stylisés de la dynamique des systèmes de villes	79
1.5.2	Une théorie évolutive urbaine	80

2 La dynamique des villes : Des modèles statistiques à la simulation dans un laboratoire virtuel 85

2.1	La loi rang-taille comme enjeu de modélisation : une modélographie	89
2.1.1	L'obsession de la loi rang-taille	89
2.1.2	Trois processus élémentaires de croissance conduisant à la formation de distributions fortement hiérarchisées	90
2.1.2.1	L'effet de la prise en compte en amont d'une distribution déjà fortement dissymétrique	90
2.1.2.2	Le processus de croissance multiplicatif ou l'effet propor- tionnel	91
2.1.2.3	Le processus d'attachement préférentiel	92
2.1.2.4	Le faible pouvoir explicatif des modèles aléatoires	93
2.1.3	Les modèles à processus économiques : les externalités positives et négatives d'agglomération	96
2.1.4	Les modèles à processus spatiaux : le jeu des interactions interurbaines	99
2.1.5	Les modèles de hiérarchisation de systèmes de peuplement : la fa- mille des modèles Simpop	103
2.1.6	Vers de nouveaux modèles de dynamiques de systèmes de villes . .	109

2.2	La mise en place d'un laboratoire virtuel pour l'élaboration des nouveaux modèles de simulation de la dynamique des villes	114
2.2.1	Les défis des modèles multi-agents	114
2.2.2	Vers une démarche de modélisation itérative et assistée par le calcul intensif	121
2.2.3	Un véritable laboratoire virtuel développé par une équipe interdisciplinaire	125
2.2.4	Deux modèles de hiérarchisation de système de peuplement	129
2.2.4.1	Un cadre théorique	129
2.2.4.2	Un cadre descriptif	132
3	SimpopLocal : un modèle de hiérarchisation des systèmes de peuplement sous contraintes environnementales	139
3.1	Modélographie des interactions société-environnement et de l'émergence du fait urbain	143
3.1.1	La modélisation multi-agents des interactions société-environnement dans le temps long	143
3.1.2	Six modèles d'interactions société-environnement	144
3.1.3	Comparaison des différentes approches de modélisation des interactions société-environnement et de l'émergence de l'urbanisation . . .	147
3.1.4	Caractérisation des pratiques de modélisation	149
3.1.5	De l'apport d'un travail de modélographie	152
3.2	Le modèle SimpopLocal	155
3.2.1	Les enjeux de simulation (<i>Purpose</i>)	155
3.2.2	Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (<i>Entities, state variables and scales</i>)	156
3.2.3	Les dynamiques de SimpopLocal (<i>Processes overview and scheduling</i>)	158
3.2.3.1	Le mécanisme de croissance avec contraintes locales	158
3.2.3.2	Le mécanisme d'impact des innovations sur la croissance .	159
3.2.3.3	Les mécanismes d'acquisition des innovations	160
3.2.3.4	Le mécanisme de création des innovations	160
3.2.3.5	Le mécanisme de diffusion des innovations	162

3.2.3.6	Le mécanisme de durée de vie des innovations	164
3.2.3.7	Note sur la modélisation de l'acquisition et de l'impact des innovations	164
3.2.3.8	Note sur le nombre total d'agents innovation	165
3.2.3.9	Le mécanisme de catastrophes	166
3.2.4	Les formalismes d'implémentation du modèle SimpopLocal	166
3.2.5	Déroulement d'une simulation (<i>Design Concept</i>)	167
3.2.5.1	L'initialisation	167
3.2.5.2	Les conditions d'arrêt	168
3.2.5.3	Déroulement d'un pas de simulation	169

4 Exploration de modèle : un protocole assisté par le calcul intensif 177

4.1	Calibrage du modèle SimpopLocal par des algorithmes évolutionnaires . . .	181
4.1.1	Les enjeux du calibrage de SimpopLocal	181
4.1.1.1	Des paramètres à calibrer pour simuler des comportements ciblés	182
4.1.1.2	Des techniques usuelles de calibrage impossibles à mettre en œuvre	185
4.1.2	Une méthode de calibrage automatique	188
4.1.2.1	Le calibrage comme un problème d'optimisation	188
4.1.2.2	L'utilisation d'algorithmes évolutionnaires	188
4.1.2.3	Une exploration de l'espace de paramétrage guidée par trois objectifs de calibrage qui prennent en compte la stochasticité du modèle	190
4.1.2.4	La spécificité des explorations par optimisation multi-objectif	194
4.1.2.5	Le recours au calcul massivement distribué	195
4.1.3	Analyse des résultats de l'exploration guidée et automatisée pour le calibrage de SimpopLocal	198
4.1.3.1	La convergence de l'algorithme évolutionnaire pour la proposition de jeux de valeurs de paramètres candidats au calibrage	198
4.1.3.2	Sélection des meilleurs paramétrages et discussion des valeurs proposées	199

4.1.4	Une méthode de calibrage efficace	206
4.2	Interprétation des comportements du modèle SimpopLocal	208
4.2.1	Illustrations de sorties d'une simulation à l'échelle du système de peuplement	208
4.2.2	Illustrations de sorties d'une simulation à l'échelle des points de peuplement	213
4.3	Une analyse de sensibilité innovante (<i>EP algorithm</i>)	217
4.3.1	L'utilisation d'algorithmes d'optimisation pour l'exploration globale de modèles multi-agents	217
4.3.1.1	L'exploration des comportements des modèles multi-agents	217
4.3.1.2	Une vue globale de l'espace de paramétrage	218
4.3.1.3	L'algorithme des profils d'exploration (<i>EP algorithm</i>) . . .	219
4.3.2	Les profils de calibrage de six paramètres du modèle SimpopLocal .	220
4.3.2.1	Application de la méthode au modèle SimpopLocal	220
4.3.2.2	Le paramètre r_{growth}	222
4.3.2.3	Le paramètre <i>InnovationLife</i>	224
4.3.2.4	Le paramètre R_{max}	225
4.3.2.5	Le paramètre <i>InnovationImpact</i>	226
4.3.2.6	Le paramètre $P_{creation}$	228
4.3.2.7	Le paramètre $P_{diffusion}$	229
4.3.2.8	Le paramètre <i>DistanceDecay</i>	232
4.3.3	L'apport de la méthode d'exploration des comportements de mo- dèles par les profils de calibrage	233
5	SimpopNet : Un modèle pour des villes en réseau	239
5.1	La coévolution entre les réseaux d'échange et les systèmes de villes : des faits stylisés pour le modèle SimpopNet	244
5.1.1	Le débat sur les liens de causalité entre l'évolution de l'accessibilité et la croissance urbaine	244
5.1.2	Un débat aux implications complexes et multi-échelle difficiles à trancher	247
5.1.3	Les faits stylisés au niveau macro-géographique de la coévolution entre le réseau de transport et la croissance urbaine	248

1. La diffusion hiérarchique du réseau innovant	249
2. L'accroissement des portées des échanges	249
3. La simplification du réseau de transport par le bas de la hiérarchie	250
4. Des réseaux de communication de plus en plus hiérarchisés et discriminants	251
5. La mise en espacement du territoire et la hiérarchisation du système de villes	253
5.1.4 Les faits stylisés au niveau micro-géographique de la coévolution entre les réseaux de transport et la croissance urbaine	254
5.1.4.1 L'effet positif de la dynamique d'une ville sur son accessi- bilité	254
5.1.4.2 Les évaluations des impacts économiques des investisse- ments dans les infrastructures de transport	256
5.1.4.3 Les travaux géographiques sur la corrélation entre la dy- namique urbaine et l'évolution de l'accessibilité	259
5.1.4.4 Résumé de l'état des connaissances sur la boucle de coévo- lution entre accessibilité et dynamique urbaine à l'échelle micro-géographique	262
5.1.5 Synthèse des faits-stylisés de la coévolution entre réseau de trans- port et dynamique urbaine : des enjeux pour le modèle SimpopNet	264
5.2 Une modélographie sur la coévolution entre les réseaux d'échange interur- bains et les systèmes de villes	267
5.2.1 Les modélisations de l'effet de l'organisation du réseau de transport sur la croissance urbaine	267
5.2.1.1 Les modèles d'impact du changement d'accessibilité sur l'économie urbaine	267
5.2.1.2 Les modèles de potentiels d'interactions avec prise en compte du réseau d'échange	268
5.2.1.3 Les modèles gravitaires de croissance urbaine avec poten- tiels d'interactions	270
5.2.2 Les modélisations de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de villes sur la croissance des réseaux de transport	271

5.2.2.1	L'évolution des approches de modélisation de la croissance de réseaux de transport	272
5.2.2.2	Les deux modèles de croissance de réseaux de GASTNER et NEWMAN (2006)	273
5.2.2.3	Les modèles de croissance de réseaux par attachement préférentiel avec dimension spatiale	276
5.2.3	Des modèles de coévolution entre les réseaux de transport et les systèmes urbains	277
5.2.3.1	Les modèles LUTI	277
5.2.3.2	Un modèle individus-centré de la coévolution système de villes et réseau de communication	279
5.3	Le modèle SimpopNet	281
5.3.1	Les enjeux de simulation (<i>Purpose</i>)	281
5.3.2	Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (<i>Entities, state variable, and scale</i>)	282
5.3.3	Les dynamiques de SimpopNet (<i>Processes overview and scheduling</i>)	285
5.3.3.1	Croissance du réseau de transport par coévolution : le mécanisme <i>coevolution-network</i>	285
5.3.3.2	Croissance scénarisée du réseau de transport : le mécanisme <i>scenario-network</i>	287
5.3.3.3	Croissance des villes par coévolution (hypothèse h1) : le mécanisme <i>coevolution-cities</i>	288
5.3.3.4	Croissance aléatoire des villes (hypothèse h3) : le mécanisme <i>gibrat-cities</i>	290
5.3.4	Déroulement d'une simulation (<i>Design Concept</i>)	291
5.3.4.1	Le formalisme d'implémentation du modèle SimpopNet	291
5.3.4.2	L'initialisation	291
5.3.4.3	La condition d'arrêt	294
5.3.4.4	Déroulement d'un pas de simulation	294
5.3.5	Les premiers résultats de l'exploration du modèle SimpopNet	297
5.3.5.1	Paramétrages du modèle SimpopNet pour deux expérimentations	297

5.3.5.2	Première expérimentation : la hiérarchisation du système de peuplement par l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine	300
5.3.5.3	Deuxième expérimentation : simulation d'un système urbain en coévolution avec le réseau de transport	303
CONCLUSION		313
ANNEXES		319
A Modélographie multi-agents de la simulation des interactions sociétés-environnement et de l'émergence des villes		321
A.1	Sugarscape	323
A.1.1	Référence	323
A.1.2	Contexte de recherche	323
A.1.3	Enjeux	323
A.1.4	Dynamiques simulées	323
A.1.5	Sorties de simulation et résultats	324
A.1.6	Conclusions et remarques	325
A.2	Artificial Anasazi	326
A.2.1	Référence	326
A.2.2	Contexte de recherche	326
A.2.3	Enjeux	326
A.2.4	Dynamiques simulées	327
A.2.5	Sorties de simulation et résultats	327
A.2.6	Conclusions et remarques	327
A.3	The Village Project	329
A.3.1	Référence	329
A.3.2	Contexte de recherche	329
A.3.3	Enjeux	329
A.3.4	Dynamiques simulées	330
A.3.5	Sorties de simulation et résultats	332

A.3.6	Conclusions et remarques	333
A.4	ENKIMDU	334
A.4.1	Références	334
A.4.2	Contexte de recherche	334
A.4.3	Enjeux	334
A.4.4	Dynamiques simulées	335
A.4.5	Sorties de simulation et résultats	336
A.4.6	Conclusions et remarques	336
A.5	SimPop	338
A.5.1	Références	338
A.5.2	Contexte de recherche	338
A.5.3	Enjeux	338
A.5.4	Dynamiques simulées	338
A.5.5	Sorties de simulation et résultats	340
A.5.6	Conclusions et remarques	341
A.6	La maximisation de l'interaction et l'observation d'une distribution des populations urbaines	343
A.6.1	Références	343
A.6.2	Contexte de recherche	343
A.6.3	Enjeux	343
A.6.4	Dynamiques simulées	344
A.6.5	Sorties de simulation et résultats	345
A.6.6	Conclusions et remarques	346
B	The Exploration Profile (EP) algorithm	347
B.1	Introduction	348
B.2	Description of the algorithm	349
	Initialization.	349
	Approximation loop.	350
	Ending.	350
B.3	Validity	350
B.4	Heuristic improvement	351

C	Procédure de génération de la spatialisation des systèmes de peuplement pour l'initialisation des modèles SimpopLocal et SimpopNet	353
C.1	La nécessité de situations initiales à structure géographique plausible . . .	354
C.2	Une procédure aléatoire de génération de situations initiales	354
	Liste des tableaux	377
	Table des figures	379

INTRODUCTION

Une inéluctable urbanisation du monde

"The world population is in the midst of a historical transition from being mostly rural to predominantly urban. [...] The level and speed of urbanization, however, varies significantly across areas, regions and countries, depending on a number of factors associated with the level and style of development in the geographical areas considered. The size distribution, the morphology of cities, the dynamics of urban growth, and the living conditions of the population living in urban and rural areas also vary quite substantially across countries and over time. [...] There is a renewed worldwide interest in these matters in the research community as well as recent major publications by the United Nations Fund for Population Activities and UN-HABITAT¹."

The Population Distribution, Urbanization, Internal Migration and Development Expert group, Population Division, United Nations, 2008.

La formidable poussée d'urbanisation du XXI^e siècle est prévisible dans son ampleur, mais elle l'est moins dans ses multiples expressions territoriales. Ces prévisions pourraient pourtant être une aide précieuse à la planification et à la gestion du développement urbain. Aussi, pour mieux orienter les politiques urbaines vers un développement durable, il est nécessaire de prévoir et de prédire les dynamiques d'urbanisation, et, avant tout, de les comprendre. La croissance des villes est donc au centre des préoccupations des grandes institutions intergouvernementales et fait l'objet d'un grand nombre de programmes de recherche.

1. <https://www.un.org/en/development/desa/population/events/pdf/expert/13/Objectives.pdf>

L'échelle du système de villes pour comprendre les dynamiques urbaines

Parmi ces travaux, l'approche géographique du fait urbain est originale. La science géographique est en effet une des seules disciplines à prôner une étude du fait urbain en tant que *système* à plusieurs niveaux d'observation. BERRY (1964) a formalisé cette approche géographique par une expression désormais célèbre : "*Cities as systems within systems of cities*". Au moins deux niveaux d'organisation sont ainsi à considérer : celui de la ville, classiquement examiné comme un ensemble de quartiers, d'institutions ou d'acteurs, et celui du *système de villes*. Ce niveau d'organisation désigne l'ensemble des villes dont les interactions réciproques façonnent leur devenir. En effet, une ville ne fonctionne jamais isolément et son évolution dépend des relations d'interdépendance qui se façonnent avec les autres villes du système.

H. Reymond a proposé dans une communication orale en 1995 une définition du fait urbain qui permet d'explicitier cette acception (retranscrite par PUMAIN (1997, p.124)) : "*Le système d'habitat urbain est l'organisme écologique de base qui, parmi tous ceux que l'espèce humaine a inventé, peut annihiler de manière ubiquiste l'ensemble des facteurs limitants d'un site, quelles que soient ses ressources propres. Les villes ont réussi à faire face aux incertitudes nées des facteurs limitants locaux, à réguler ces difficultés locales, en développant des liaisons multiples, des réseaux sur lesquels les vitesses sont de plus en plus grandes. Les sites ainsi mis en correspondance peuvent recevoir des populations qui dépassent de beaucoup ce que permettrait le site initial. Cette évolution n'est pas terminée, et l'on continue d'inventer l'outil que deviennent ces villes.*"

La cohérence de ces deux niveaux d'observation pour l'étude du fait urbain se manifeste dans la persistance de l'organisation des systèmes urbains. Leurs configurations spatiales sont régulières, leurs organisations hiérarchiques sont durables, et la variété économique et sociale des villes en interaction persiste dans le temps. Cette pérennité repose pourtant sur le caractère dynamique et évolutif du système de villes : c'est parce que la nouveauté et les changements se répercutent dans tout le système qu'il conserve son unité. PRED (1973, p.11) donne dans ce sens une définition du système de villes : "*A system of cities is here conceived as a set of cities which are interdependant in such a way that any significant change in the economic activities, employment structure, total income, and/or population of one member city will directly or indirectly bring about some alternation in the economic activities, occupational structure, total income, and/or population of one or more other set member.*"

Comme nous le verrons, ces grandes régularités sont la signature des systèmes de villes, et doivent donc nécessairement émerger de processus de croissance communs. Pourtant ces mécanismes d'évolution urbains restent largement inconnus.

S'appuyer sur les savoirs accumulés par l'équipe de recherche d'accueil

L'étude de ces grandes récurrences dans les systèmes de villes a conduit l'équipe P.A.R.I.S. du laboratoire Géographie-cités, qui a accueilli cette thèse, à la construction de bases de données sur l'évolution démographique et des fonctions économiques de systèmes urbains de nombreux pays du monde dans le temps long (projets pour la DATAR puis le Ministère de l'Équipement dès les années 1970-80, puis projets pour la Communauté européenne (Espon, FOCl) dans les années 1990-2010, projet ANR Harmonie-cités, projet ERC GéodiverCity en cours). Leurs analyses ont permis de rassembler de nombreuses connaissances sur les formes d'évolution des villes et sur les trajectoires possibles de systèmes de villes.

Ces savoirs nourrissent un travail de théorisation sur les processus de croissance urbaine au sein de projets de recherche (projet Archaeomedes, ANR TransMonDyn, ERC GeodiverCity), qui permettent d'affiner l'élaboration d'une *théorie évolutive urbaine* (PUMAIN, 1997 ; PUMAIN, 2000 ; PUMAIN, 2009). Cette théorie cherche à expliciter les processus de la dynamique des villes et considère que *"la concurrence entre l[e]s éléments [les villes], pour la captation et la création de richesses, par l'échange, l'innovation (anticipation) et l'adoption (imitation) des innovations"* est le principal moteur de la dynamique des villes (PUMAIN, 1997, p.129). Ce sont les interactions de concurrence et d'imitation entre les villes qui expliquent la forme générale de l'organisation de ces systèmes, leur hiérarchie et leur différenciation fonctionnelle. Cette dynamique traduit un processus d'adaptation des villes aux changements qui explique à la fois leur ajustement rapide aux transformations socio-techniques, et les changements plus lents de la trame des villes, de leur dimension et de leur espacement, ainsi que de leurs fonctions socio-économiques, c'est à dire l'évolution de l'organisation du système de villes.

Cette théorie guide la construction des modèles de dynamiques urbaines du projet Simpop auquel est affilié cette thèse. Les modèles Simpop et SIMPOP2 sont des *transcriptions computationnelles* (LOUAIL, 2010) de la théorie, sous la forme de modèles multi-agents, qui visent à tester par la simulation les processus explicatifs de la dynamique des villes qu'elle postule. Ces modèles ont permis de reconstruire l'émergence et l'évolution de systèmes urbains (BURA et al., 1996 ; SANDERS et al., 1997), différenciés en fonction de l'histoire des systèmes de peuplement, européen ou américain (BRETAGNOLLE, GLISSE et al., 2007 ; BRETAGNOLLE et PUMAIN, 2010), ou encore projetées dans l'avenir sur une cinquantaine d'années dans le cas de l'Europe (SANDERS, 2010). Ils montrent ainsi que les processus explicatifs proposés par cette théorie sont de bons candidats à l'explication de la dynamique des villes. Les modèles Simpop sont des modèles multi-agents réalistes, riches et complexes. Toutefois la multiplicité des mécanismes implémentés et les temps de simulation relativement longs ont rendu très difficile une large exploration des comportements simulés. Aussi les dynamiques qu'ils représentent n'ont pas pu être totalement

validées à partir du très petit nombre de simulations (une centaine effectuées par essais et erreurs dans chaque cas) qu'il a été possible de réaliser pour caler les évolutions simulées sur les données empiriques disponibles.

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons développer une approche complémentaire de modélisation qui vise à la construction de modèles de simulation explicatifs de la dynamique des villes, affiliés aux modèles Simpop, mais dont les hypothèses constitutives pourraient être plus aisément évaluées. La réflexion que nous proposons de mener s'intègre donc au sein d'une réflexion globale de théorisation de la croissance urbaine et s'appuie sur les savoirs accumulés par le laboratoire Géographie-Cités.

Pour une nouvelle approche de modélisation

Nous nous sommes donc fixée comme défi la recherche de nouvelles façons d'instancier la théorie évolutive des villes qui offrent la possibilité d'en évaluer les hypothèses essentielles. Notre projet nécessite d'abord l'élaboration de modèles bien plus simples, mais très génériques et robustes dans la sélection de leurs mécanismes fondamentaux. Cette apparente simplicité permet en revanche une large exploration des comportements de simulation, pour une connaissance fine des modèles et de tous les mécanismes simulés. Cet objectif de modélisation requiert par ailleurs la mise en place d'un protocole de validation de modèles de simulation. Cependant la pratique de telles procédures d'évaluation de modèles de simulation multi-agents n'est pas encore courante (AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007 ; CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008 ; HEPPENSTALL, CROOKS et al., 2011). Aussi les retours d'expériences détaillant l'application de méthodes ou l'utilisation d'outils spécifiques manquent au début du projet. Pour le mener à bien, il est donc nécessaire de concevoir, de développer et d'éprouver des outils nouveaux d'aide à l'exploration et à l'évaluation de modèles multi-agents. Pour ces raisons, nous proposons dans cette thèse une approche nouvelle de la modélisation que nous appliquons à la simulation de la dynamique des villes.

Deux modèles de dynamique des villes pour deux régimes de croissance urbaine

Une étude attentive de l'évolution de l'urbanisation dans le temps long met en évidence plusieurs formes de croissance urbaine. Au moins deux régimes de croissance urbaine sont à distinguer dans la constitution des systèmes urbains : un avant et un après la transition urbaine, intervenue suite à la première révolution industrielle dans les pays anciennement industrialisés. Ce qui distingue ces deux régimes du point de vue géographique relève d'abord des rythmes quantitativement très différents de développement des villes et des différences d'emprise physique sur le territoire, tout autant que de leur prégnance sur

l'évolution sociétale. Mais en simplifiant beaucoup, il est possible de faire l'hypothèse que dans les deux cas l'accessibilité aux ressources joue comme une contrainte sur la croissance des centres de peuplement et que les changements dans les conditions de cette accessibilité ont déclenché le passage d'un régime à l'autre. Dans le premier cas, cette contrainte de l'accessibilité aux ressources procède avant tout de l'incertitude sur le niveau local des ressources : les coûts et la pénibilité des échanges à longue distance limitent le niveau de croissance à ce qui peut localement être accessible et exploitable. Dans le second cas, la révolution industrielle relâche la limitation des échanges à longue distance grâce à une diminution des coûts de transport. Ce qui différencie les croissances des centres de peuplement n'est plus les limitations locales en ressources mais plutôt leurs capacités à étendre leurs échanges de richesses, au sein d'un système de villes en interactions. Les villes bénéficiant des meilleures accessibilités globales dans le système ont des échanges facilités. La situation relative des villes les unes par rapport aux autres dans le système de villes, résumée par leur accessibilité au sein du système, joue alors comme une contrainte sur la croissance urbaine, qui semble alors se déployer de façon autonome dans le système des villes, d'une manière relativement déconnectée de la disponibilité des ressources locales.

Deux modèles de simulation couvrant ces deux régimes d'urbanisation sont donc nécessaires pour valider ces hypothèses sur l'évolution des rapports entre croissance urbaine et accessibilité aux ressources (c.f. figure 1) :

- le modèle **SimpopLocal** simule le régime de dynamique des centres de peuplement à croissance fortement contrainte par les conditions locales, un régime amorcé lors de l'apparition des premières villes et caractérisé par une économie majoritairement agraire d'exploitation des richesses d'un site ;
- et le modèle **SimpopNet** simule, quant à lui, le régime de dynamique à croissance rapide et libérée des contraintes locales à la faveur d'une révolution technique, notamment dans les transports. Il en résulte une multiplication des échanges et une mise en réseau des économies urbaines qui dessine une toute autre contrainte à la croissance : celle de la situation relative d'une ville dans le réseau formé par les échanges interurbains.

La compréhension des rapports entre les processus d'urbanisation et les quantités de ressources accessibles est donc au cœur du projet de thèse. Ce sujet intéresse tout particulièrement l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), dont il a bénéficié du soutien sous la forme d'une bourse doctorale.

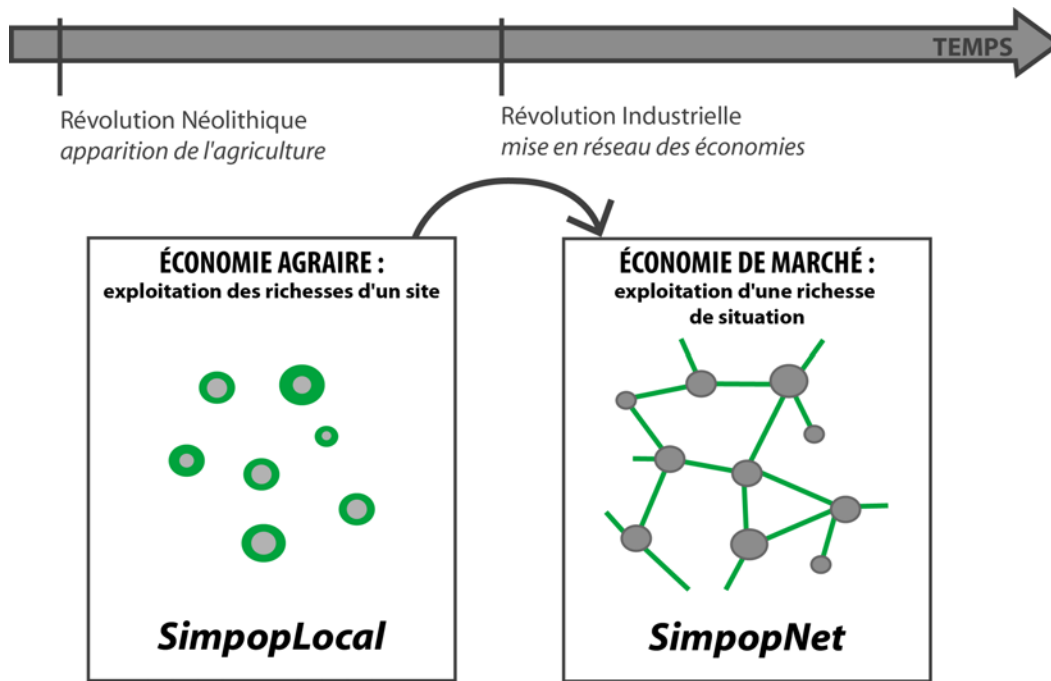


Figure 1 – Deux régimes de croissance de système de villes sous la contrainte d'accès aux ressources

Un renouvellement collaboratif et inter-disciplinaire des protocoles d'évaluation de modèles de simulation

Ces deux nouveaux modèles, SimpopLocal et SimpopNet, doivent être construits comme des *représentations schématiques de la réalité, élaborées en vue de la comprendre et de la faire comprendre* (HAGGETT, 1965 ; MINSKY, 1965). Ces schématisations peuvent ainsi aider à comprendre les dynamiques urbaines en nous permettant de comparer par la simulation des hypothèses alternatives sur leurs processus et en confrontant les résultats ainsi obtenus aux connaissances scientifiques acquises. Cependant pour donner du sens aux hypothèses que l'on teste grâce à ces modèles de simulation, il est nécessaire d'en connaître tous les comportements, c'est-à-dire toutes les conséquences possibles du postulat de chaque hypothèse et de leur combinaison. Cette connaissance fine des comportements du modèle requiert la simulation d'un très grand nombre de combinaisons de paramétrage, ce qui exige, en conséquence, de lourdes charges de calcul.

Pour remplir leur rôle d'évaluateur d'hypothèses sur la dynamique des villes, les modèles SimpopLocal et SimpopNet, doivent donc être suffisamment simples pour qu'une exploration massive puisse être mise en œuvre. Cette exploration peut déterminer si les mécanismes du modèle sont de bons candidats à l'explication des processus urbains et ainsi permettre de spécifier si les mécanismes implémentés et leurs interactions sont :

- *suffisants*, c'est-à-dire capables d'engendrer les comportements recherchés. Cette

condition revient à déterminer si le modèle peut être calibré pour reproduire un état et une évolution de systèmes urbains ciblés.

- et *nécessaires* : c'est-à-dire indispensables à la simulation d'une dynamique de système de villes représentative des connaissances scientifiques.

Cette étape de la modélisation a nécessité la mise en œuvre de protocoles d'exploration et d'évaluation de modèles encore inédits en sciences humaines et sociales. Ce besoin est à l'origine de la création d'un véritable laboratoire virtuel d'exploration de modèles de simulation en géographie. Ce laboratoire, nommé SimProcess (REY COYREHOURCQ, 2014) rassemble maintenant des méthodes, des outils et des procédures de modélisation adaptés à l'élaboration et à l'exploration de modèles qui reposent sur le logiciel OpenMole (REUILLON, CHUFFART et al., 2010 ; REUILLON, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ, 2013). OpenMole est un outil d'aide à la conception de plans d'expérimentation qui, en donnant accès au calcul distribué, favorise l'exploration intensive de modèles de simulation. La conception, toujours en cours, de toutes ces méthodes intégrées au sein du laboratoire SimProcess est le fruit d'une collaboration inter-disciplinaire entre le programme ERC GeoDiverCity et l'Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de-France. Elle a d'abord pris la forme de deux thèses, celle de Sébastien Rey-Coyrehourcq et celle-ci, assistées dans leur réalisation par un contrat post-doc mené par Romain Reuillon et un contrat d'ingénieur d'étude conduit par Mathieu Leclaire. Un deuxième contrat post-doc mené par Paul Chapron et une troisième thèse pilotée par Clémentine Cottineau se sont ensuite rattachés au projet. Cette collaboration de plus de quatre ans a notamment permis de mettre au point un protocole de calibrage automatisé (qui a résolu le problème de l'évaluation de la suffisance du nombre de mécanismes implémentés) et un protocole d'évaluation de la contribution au comportement simulé de chaque mécanisme implémenté (qui a résolu le problème de validation de la nécessité des mécanismes implémentés).

Tout au long de ce mémoire de thèse, j'utilise un *nous* de style. Il représente le socle collaboratif sur lequel repose la thèse. Néanmoins, la majorité des réflexions présentées dépend de mon entière responsabilité et lorsque je ne partage pas la paternité de l'une d'entre elles, cela est explicitement précisé.

Structure de la thèse

Le mémoire de thèse n'est le reflet que d'une petite partie du travail accompli. En effet le texte ne rend pas compte de toutes les itérations nécessaires à la construction des modèles, de toutes les phases de correction et *débogage* des codes des modèles et des codes des protocoles d'exploration. Il se compose de cinq chapitres.

Le premier chapitre examine les grandes régularités dans le temps et dans l'espace de la dynamique des villes. À partir de nombreux travaux d'analyse de données empiriques et de

théorisation publiés depuis plus de 150 ans, nous définissons un ensemble de *faits stylisés* de l'évolution des systèmes urbains. La persistance de ces faits stylisés est caractéristique des dynamiques urbaines et subsiste au delà des adaptations dont celles-ci ont fait preuve suite aux évolutions des conditions environnementales et matérielles des sociétés. Parmi ces grandes caractéristiques, le processus de hiérarchisation des systèmes de peuplement semble une particularité centrale de la dynamique urbaine. Les faits stylisés ainsi identifiés sont essentiels au travail de modélisation de la dynamique des systèmes de villes : ils peuvent servir d'outils pour l'évaluation de modèles et peuvent guider l'élaboration des mécanismes des nouveaux modèles.

Le deuxième chapitre examine les formes de modélisation qui ont déjà été proposées pour expliquer ces régularités dans les dynamiques des villes. Ce chapitre s'attache tout particulièrement à la présentation de travaux consacrés à la simulation du processus de hiérarchisation des systèmes urbains. Nous verrons en quoi des lacunes dans ces propositions nous ont poussé à constituer un laboratoire virtuel pour la conception et l'exploration de nouveaux modèles explicatifs. Cette structure de modélisation innovante permet de définir les fondements de deux nouveaux modèles de simulation de la dynamique des systèmes de peuplement.

Le troisième chapitre présente, selon un protocole systématique, le premier modèle de ce projet, le modèle SimpopLocal qui modélise le processus d'organisation hiérarchique du système de peuplement au moment de l'émergence des premiers centres urbains. Après avoir exposé ses fondements théoriques et les modèles qui ont été source d'inspiration pour sa conception, la structure et les mécanismes du modèle SimpopLocal sont exposés en détail.

Le quatrième chapitre rapporte les résultats d'une exploration approfondie du modèle SimpopLocal. Nous présentons dans un premier temps la construction et l'application d'une méthode de calibrage par explorations automatisées des comportements du modèle. Puis nous proposons et testons une deuxième méthode, dérivée de la première, pour évaluer de manière indépendante le rôle de chaque mécanisme dans la génération des comportements recherchés. Ces résultats nous permettent de conclure sur les contributions méthodologiques et théoriques du modèle SimpopLocal.

Le cinquième chapitre est consacré au modèle SimpopNet. Ce modèle simule les processus de co-évolution entre un système de villes et son réseau de transport sur lequel repose les échanges inter-urbains moteurs de la croissance des villes. Les fondements théoriques du modèle et l'ensemble des modèles dont il s'inspire sont tout d'abord présentés, avant de détailler la structure et les mécanismes du modèles. Enfin, les premiers résultats, très encourageants, de simulation du modèle sont exposés et commentés en dernière partie.

Cette thèse s'achève par une conclusion générale qui synthétise les résultats de l'ensemble de cette démarche de modélisation.

CHAPITRE 1

La dynamique des villes : de grandes régularités à expliquer

"Everyone knows what a city is, except the experts"

H. Miner, 1967

1.1	La hiérarchie et la spatialisation du système de peuplement	36
1.1.1	Distributions statistiques des tailles de centres de peuplement	36
1.1.2	Des interprétations pour cette structure des systèmes de peuplement fortement hiérarchisée	40
1.1.3	Un processus de hiérarchisation croissante	42
1.1.4	La répartition spatiale des centres de peuplement	45
1.2	Les interactions spatiales urbaines	48
1.2.1	Modélisation des échanges entre les villes par les effets de la distance et de la taille : le modèle gravitaire	48
1.2.2	Les modèles de situation : le potentiel	51
1.2.3	La diffusion des innovations	51
1.2.4	Les interactions dans la dynamique des villes	53
1.3	Les innovations et la complexification urbaine	56
1.3.1	Les lois d'échelle dans le système de villes	56
1.3.2	Les cycles d'innovation et la complexification des fonctions urbaines	58

1.3.3	La taille démographique d'une ville comme marqueur de sa complexité	63
1.3.4	Auto-catalyse de l'innovation et de l'urbanisation	65
1.3.5	Innovations dans les transports : Les effets de la contraction de l'espace-temps sur le système de villes	65
1.4	Le processus d'urbanisation	68
1.4.1	Une urbanisation croissante marquée par deux grandes inflexions	68
1.4.2	Deux régimes de dynamiques urbaines	73
1.4.2.1	Un régime de dynamique des centres de peuplement à croissance fortement contrainte par les conditions locales	74
1.4.2.2	Un régime de dynamique à croissance rapide et libérée des contraintes locales	77
1.5	Des faits stylisés à unifier au sein d'une théorie urbaine	79
1.5.1	Les faits stylisés de la dynamique des systèmes de villes	79
1.5.2	Une théorie évolutive urbaine	80

Introduction : L'universalité du fait urbain ?

"Cette ville est si grande et si belle que je n'en dirai pas la moitié de ce que je pourrais en dire [...] car elle est plus grande que Grenade ; elle est mieux fortifiée ; ses maisons, ses édifices et les gens qui les habitent sont plus nombreux [...] et mieux approvisionnés de toutes les choses de la terre, pain, oiseaux, gibiers, poissons des rivières, légumes, [...]. Parmi (les) temples, il y en a un, le principal, dont nulle langue humaine ne pourrait dire la grandeur et la beauté ; car il est si vaste (qu'on) pourrait y installer une ville de 1 500 habitants"

Description de Tenochtitlan en 1519 – citation de la lettre à Sa Majesté l'empereur Charles Quint d'Hernan Cortés

Quand H. Cortés entre dans Tenochtitlan (actuelle Mexico) en 1519, il sait qu'il entre dans une ville. Il n'en a jamais vu de pareille, il est impressionné tant par ses dimensions grandioses que par sa richesse inimaginable. C'est la première rencontre entre deux civilisations vieilles de quelques centaines d'années. Deux civilisations qui ont été fondées et qui ont évolué indépendamment. Deux civilisations qui n'ont jamais interagi et n'ont jamais rien partagé, sauf un mode d'habitat que H. Cortés identifie immédiatement : l'urbanisation. Les termes *ville* et *cité* sont employés d'un bout à l'autre de la planète, et depuis plusieurs millénaires, pour désigner des objets géographiques qualitativement et quantitativement très différents, autant du point de vue social, culturel, politique, qu'économique. Qu'y a-t-il de commun entre l'ancienne Tenochtitlan des Aztèques, le Grenade du XVI^e siècle et l'actuelle Mexico, entre les cités médiévales corsetées dans leurs enceintes et les métropoles qui s'étalent sur des kilomètres et des kilomètres, entre un petit bourg endormi et une métropole bourdonnante ? L'emploi d'un terme identique pour recouvrir des formes si diverses a l'avantage de susciter des questions sur l'universalité du fait urbain, c'est-à-dire l'universalité de la notion de ville, et sur l'unicité et la cohérence de son développement historique.

Les définitions de la ville varient selon qu'elles incorporent des notions administratives, politiques, sociales ou historiques.

"Pour la démographie, la ville est un groupement permanent de population sur un espace restreint. Grande dimension et forte densité de l'agrégat de peuplement vont de pair avec une définition morphologique, qui reconnaît la permanence et la continuité des constructions, et des règles d'urbanisme dans leur organisation. Cette conception implique que la ville ne puisse produire, sur la surface limitée qu'elle occupe, la totalité des ressources alimentaires dont ses habitants ont besoin. Leur survie dépend donc de l'échange des biens manufacturés et des services qu'ils produisent contre des denrées agricoles

nécessaires à leur subsistance. Il en résulte une définition fonctionnelle, sociale et économique de la ville, qui regroupe des activités non agricoles, et qui innove en développant une division sociale du travail plus ou moins complexe, ce qui lui permet de se maintenir et de croître grâce à une base économique diversifiée."

(PUMAIN, 2003, p.102)

Cette appréciation de l'urbain est aussi décrite par M. Roncayolo :

"La notion de ville implique l'agglomération d'une population, c'est-à-dire la concentration de l'habitat et des activités; des activités qui se distinguent de l'exploitation directe du sol, conduisent à la spécialisation des tâches et contribuent notamment aux échanges et à l'encadrement de la société; un mode de vie ou des formes de sociabilité particulières; un aménagement des espaces et des objets urbains qui implique une organisation collective. [...] [L]a spécificité de la ville se révélerait en deux directions. D'une part, la ville ne peut être saisie uniquement à l'intérieur de ces limites. Elle n'est pas création isolée. Elle se présente, à des degrés variables, comme lieu à partir duquel s'établit un contrôle territorial. Ainsi se développent les notions de *réseau urbain* ou d'*armature urbaine*. D'autre part la ville ne se réduit pas à des objets urbains ou à une combinaison de fonctions. Elle regroupe une population, caractérisée par une certaine composition, démographique, sociale ou ethnique. Elle définit une forme de communauté (ou de coexistence de communautés) ou de collectivité, donc essentiellement politique dans son principe."

(RONCAYOLO, 1997, p.29)

Si l'objet ville perdure dans ses représentations matérielles (localisation, constructions bâties selon un tissu dense et organisé) comme dans ses représentations collectives (identité, nom, symboles, réseaux d'alliances et de conflits) alors que sa forme et sa structure évoluent dans le temps et diffèrent dans l'espace, c'est que l'*objet géographique ville* fait sens parce qu'il existe des régularités communes dans sa structure et sa dynamique en dépit de la diversité des histoires locales. À partir de la deuxième moitié du XX^e siècle, la Nouvelle Géographie (de E. Ullman, P. Haggett, T. Hägerstrand, etc.) a apporté un nouveau paradigme à la discipline qui s'opposait à l'exceptionnalisme alors dominant (c'est-à-dire l'étude du particulier et du singulier géographique) par la promulgation d'une réflexion quantificatrice, modélisatrice et théorisante des processus spatiaux. Dans ce contexte, la ville et le fait urbain ont pris une grande place dans les réflexions. Dans ce chapitre nous cherchons à retranscrire les résultats des recherches sur l'identification des grandes régularités qui donnent sens à la notion d'universalité du fait urbain. Parce que ces travaux quantifient, théorisent et modélisent des observations empiriques à la recherche des

grandes régularités statiques et dynamiques des villes, il est possible d'en extraire les *faits stylisés* du fait urbain. Ces faits stylisés sont tirés des études de très grands nombres de cas réels, sont donc des généralisations et des simplifications des caractéristiques urbaines et permettent la définition de l'objet géographique ville. Pour les économistes, qui ont popularisé et généralisé leur utilisation dans les sciences, un fait stylisé est une présentation simplifiée (i.e. taux, ratio ou écart) d'une régularité empirique sur l'observation de laquelle il y a un large accord (KALDOR, 1957). Nous ne limiterons pas la définition des faits stylisés urbains à des caractéristiques statiques, mais traduirons aussi de façon stylisée les grandes tendances d'évolution. La définition du fait urbain par des faits stylisés nous servira ensuite de cadre théorique pour la construction de modèles de dynamique des villes : soit parce que ces faits stylisés préciseront des comportements à traduire en mécanismes, soit parce qu'ils détermineront les objectifs des comportements à atteindre par la modélisation. Cette utilisation nous permet de préciser le besoin de faits stylisés qui rendent compte de processus représentatifs de la dynamique des villes. Trois échelles de la ville sont habituellement observées en géographie : l'échelle *micro-géographique* ou de l'intra-urbain, l'échelle *méso-géographique* ou de la ville, et l'échelle *macro-géographique* ou de l'inter-urbain. Cependant, comme nous l'avons vu dans une définition donnée en début d'introduction, la ville ne fonctionne pas de façon indépendante et ne peut pleinement se comprendre aux seules échelles micro- ou méso-géographique. Nous nous positionnons donc directement à l'échelle du système de villes, la seule échelle qui permet de rendre compte des processus en jeu.

La littérature qui peut être mobilisée sur un sujet aussi vaste est simplement gigantesque. Nous nous attachons donc à en faire une petite revue, qui ne peut être exhaustive mais qui se fondera sur des travaux centralisateurs de connaissances et des états de l'art. Parce que leur validité a été éprouvée sur de grands nombres de cas empiriques, les modèles statistiques et explicatifs tiendront une place forte dans ce chapitre et seront à l'origine de la définition de faits stylisés. Cette définition d'une dynamique stylisée des villes est construite autour de quatre grands thèmes inter-connectés : l'organisation hiérarchique et spatiale du système de villes et son évolution (section 1.1, les interactions interurbaines (section 1.2), les innovations et la complexification urbaine (section 1.3), et finalement les grandes phases dans le processus d'urbanisation du monde (section 1.4). Les faits stylisés sont ensuite intégrés au sein d'une théorie évolutive urbaine unificatrice qui servira de cadre théorique à l'élaboration des modèles présentés dans cette thèse (section 1.5).

1.1 La hiérarchie et la spatialisation du système de peuplement

1.1.1 Distributions statistiques des tailles de centres de peuplement

La distribution statistique des tailles de villes fait l'objet d'une curiosité scientifique d'une extraordinaire longévité et d'une remarquable pluridisciplinarité. Une multitude de travaux de géographes, économistes, archéologues, statisticiens, historiens et physiciens ont alimenté les observations et les théorisations autour d'un constat majeur : quels que soient le lieu ou la période examinés, on observe toujours un petit nombre de grands centres de peuplement et un très grand nombre de moyens et petits centres, c'est-à-dire, une distribution très inégalitaire et hiérarchique des tailles de centres de peuplement mesurée en nombre d'habitants. Cette caractéristique est d'autant plus frappante que de nombreux travaux empiriques montrent son universalité autant spatiale (échelle ou lieu considérés) que temporelle (époque étudiée) : que l'on évalue des distributions des tailles de centres de peuplement sur des sites archéologiques ((FLETCHER, 1986 ; LIU, 1996 ; DURAND-DASTÈS et al., 1998 ; DRENNAN et PETERSON, 2004 ; SMITH, 2005 ; GARMY, 2009, entre autres)), sur d'actuels systèmes de villes de pays ou régions du monde (BERRY, 1961 ; PUMAIN, 1982 ; GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990 ; MORICONI-EBRARD, 1993 ; BATTY, 2001 ; SOO, 2005), ou historiques (DE VRIES, 1984, notamment). Des expressions qualitatives de cette hiérarchisation sont apparues très tôt (tel que Botero en 1588 (PUMAIN et GAUDIN, 2002)), mais les travaux de AUERBACH (1913) puis de ZIPF (1949) ont ensuite offert des modèles qui proposent une forme statistique régulière du lien entre la taille et le rang d'un centre dans le système. Ces modèles ont permis une comparaison quantitative entre les organisations de systèmes réels et celles des systèmes 'modèles' et sont devenus le point de départ d'une passion intellectuelle encore bien vivante pour l'étude empirique et théorique des formes de hiérarchisation des centres de peuplement, comme l'atteste le très récent numéro spécial de la revue *Région et Développement* (n°36, 2012) "Urban hierarchies and city growth - Recent developments on Zipf's and Gibrat's laws for cities", édité par A. Schaffar. Le modèle proposé par Auerbach lie la taille d'une ville à son rang dans la hiérarchie du système de villes et est très bien résumé par A. Schaffar dans son introduction :

"[...] un bref article de quatre pages de Auerbach (1913) fait remarquer, en premier, la constance singulière de la valeur du produit de la population d'une ville par son rang, au sein d'un système urbain donné. La population de la deuxième plus grande ville représente à peu près la moitié de la population de la première, celle de la troisième ville un tiers de la première et, de façon

plus générale, la population de la ville de rang n , une proportion $1/n$ de la population de la plus grande ville. Auerbach établit, ainsi, un premier modèle rang-taille où le nombre des villes est en relation inverse avec leur poids démographique respectif".

(SCHAFFAR, 2012, p.5)

Mais ce sont surtout les travaux de Zipf (ZIPF, 1949) et Simon (SIMON, 1955), qui portent cette relation en progression géométrique entre taille et rang de villes au statut de loi en sciences sociales. Dans son expression la plus générique, la loi rang-taille s'exprime comme :

$$P(i) = kr(i)^{-a}$$

avec P la population de la ville i mesurée en nombre d'habitants, r son rang selon un ordre décroissant, k et a des constantes. Le passage aux logarithmes permet d'ajuster la valeur de ces paramètres :

$$\log(P(i)) = \log(k) - a.\log(r(i))$$

a , la pente de la droite d'ajustement linéaire, mesure le degré d'inégalité entre les tailles de villes dans le système étudié. Plus sa valeur est grande et s'éloigne de zéro et plus le système est fortement hiérarchisé et inégalitaire. Lorsqu'elle est proche de 1, la taille de la r -ième ville est inversement proportionnelle à son rang et k est égal à la taille de la plus grande ville. Les ajustements sur de nombreux cas empiriques (avec une diversité d'échelles d'application spatiale et d'époques considérées) ont montré que a est en effet proche de 1, élevant cette relation géométrique spécifique entre nombre et taille des villes au statut de "loi de Zipf". Cette loi présente la remarquable propriété d'être invariante d'échelle : quelle que soit l'échelle à laquelle on regarde le système (au niveau des très grandes villes ou au niveau des bien plus petites), la forme et la structure de la distribution restent les mêmes et sont entièrement déterminées par le paramètre a . C'est d'ailleurs cette propriété caractéristique des fonctions puissance qui est responsable de la forme en "droite" de la distribution des tailles sur les graphiques bi-logarithmiques. Cet ajustement des distributions empiriques par des lois rang-taille constitue donc un véritable outil comparatif (FAVARO, 2007) : la valeur de a représente un indicateur synthétique de l'inégalité d'une distribution qui est très facile à calculer en première approximation par une régression linéaire, et qui permet la comparaison entre des cas empiriques aussi variés que nécessaire, grâce à son insensibilité à la taille (et donc à l'échantillonnage de la distribution observée). Cependant cette généralité d'utilisation présuppose que la distribution des tailles de villes soient effectivement très bien résumée dans des ajustements par des fonctions puissance.

Les ajustements de la loi rang-taille à des données empiriques soulèvent deux problèmes majeurs bien connus (FAVARO, 2007). Si la loi rang-taille rend bien compte de

la structure du haut de la hiérarchie, elle surestime le nombre de petits centres de peuplement lorsque ceux-ci sont pris en compte dans l'échantillon du système examiné : sur un graphique bi-logarithmique rang-taille, la distribution observée, de forme linéaire en début de hiérarchie, marque une incurvation descendante vers la queue de la hiérarchie. Cette rupture intervient à de faibles niveaux de hiérarchie (aux alentours des villes de 2000 à 5000 habitants)(FAVARO, 2007). Ce décrochement fut d'ailleurs interprété par G. Zipf comme un seuil de rupture entre urbanité et ruralité (PUMAIN, 1982, p.28). Les ajustements par la loi rang-taille présentent un deuxième problème, lié au premier : l'ajustement de l'exposant a est sensible au seuil minimal de taille de ville considéré dans l'échantillon. FAVARO (2007, p.24) rapporte que "*d'après E.J. Malecki (1980) pour les États-Unis et F. Guerin-Pace (1995) pour la France, le degré d'inégalité signifié par l'exposant est d'autant plus fort que ce seuil est faible*". En d'autres termes, la loi rang-taille sous-estime la taille de petits centres de peuplement quand on les prend en compte dans la distribution ou sinon surestime leur nombre.

Une deuxième distribution statistique est largement utilisée comme alternative pour étudier la forme de la distribution des tailles dans les systèmes de peuplement : la loi log-normale. Dans son ouvrage sur les inégalités économiques, GIBRAT (1931) réalise la première application aux systèmes de villes. Cet ajustement est ensuite de plus en plus utilisé (BERRY, 1961). Cependant la loi log-normale ne possède pas la propriété de l'invariance d'échelle, ce qui rend sensible son ajustement (les paramètres moyenne et écart-type) à la structure de l'échantillon et notamment au seuil minimal de taille considéré dans l'échantillon (FAVARO, 2007). La valeur d'ajustement de ces paramètres n'est donc pas comparable d'un ajustement empirique à l'autre – à moins de considérer une loi log-normale à trois paramètres (moyenne, écart-type et seuil minimal) (GIBRAT, 1931).

Le choix de l'utilisation de l'une ou l'autre de ces distributions statistiques pour l'ajustement des distributions empiriques est loin d'être évident. "*[E]n pratique, ces deux distributions sont difficiles à distinguer l'une de l'autre, même si l'on constate que, généralement, la loi log-normale s'ajuste mieux à un système de peuplement complet, tandis que la loi puissance s'ajuste bien dans le haut de la hiérarchie urbaine et tend à surestimer la taille des petites villes.*" (FAVARO, 2007, p.11). Il précise ainsi que la difficulté à choisir l'une ou l'autre distribution dans de nombreux cas est un problème bien connu mais assez peu traité. La difficulté du choix repose sur deux problèmes. D'abord ces distributions fortement dissymétriques ont une structure très similaire et le passage de l'ajustement par l'une à l'autre de ces lois est relativement aisé. Le second problème est qu'une procédure d'ajustement, aussi précise soit-elle, n'est pas un test statistique d'ajustement. On estime seulement des paramètres, mais on ne teste pas statistiquement l'hypothèse que l'échantillon observé provient bien d'une variable aléatoire suivant une loi puissance ou log-normale. PUMAIN (2012) insiste d'ailleurs sur la faible nécessité d'améliorer les mé-

thodes d'ajustement empirique compte tenu des données disponibles dont la qualité de détail ne peut rendre justice au raffinement des méthodes utilisées :

"Dès 1964, Quandt avait établi un inventaire des lois candidates à la description des distributions très dissymétriques, en indiquant qu'il était sans doute illusoire de chercher le « meilleur modèle » à partir d'un ajustement à des données empiriques. Barbut (2006) a d'ailleurs montré la parenté entre toute une famille de distributions aléatoires, de la loi normale à la log-normale en passant par les lois de Levy et les parétiennes, et en démontrant qu'il est possible de passer facilement de l'une à l'autre en modifiant très légèrement les valeurs des paramètres de leurs processus générateurs."
(PUMAIN, 2012, p.36)

Cette question du choix de la méthode d'ajustement souligne l'importance de la qualité de la mesure des données empiriques mais surtout de la définition des systèmes étudiés : Comment comptabiliser la taille d'une ville, quelle définition de la ville prendre (unité urbaine, administrative, etc.) ? Quelles limites choisir pour la définition du système considéré ?

FAVARO (2007, p.27) avance qu'"il est possible que, du moins dans les premiers temps, ce soient plutôt les vertus comparatives de la loi puissance que lui confère son coefficient unique, invariant à l'échelle, qui lui ont permis d'acquérir le statut privilégié qu'on lui connaît aujourd'hui, plutôt qu'une supériorité avérée comme représentation théorique de la distribution des tailles de villes". Et SANDERS (2012, p.129) d'ajouter : "*La distribution rang-taille est ainsi utilisée comme outil, et la loi de Zipf comme référence*". Elle propose dans cet article une réflexion épistémologique sur les travaux scientifiques autour de la hiérarchie des systèmes de peuplement et met en évidence leur variété :

"Certains cherchent à tester le caractère universel de la relation rang-taille, en particulier des systèmes de villes, la référence de la plupart des travaux étant la loi de Zipf (1949), avec un coefficient de Pareto égal à 1. D'autres s'intéressent au contraire aux différentes formes d'écart à cette relation, cherchant d'une part à identifier la significativité de ces écarts (SAVAGE, 1997) et d'autre part à repérer des régularités dans des distributions convexes ou primatiales (BERRY, 1961 ; DRENNAN et PETERSON, 2004). Dans les deux cas, qu'il s'agisse d'une distribution en adéquation avec la loi de Zipf ou s'en écartant, il s'agit de réfléchir à l'interprétation empirique des distributions observées et à l'explication théorique de leur émergence [...]."
(SANDERS, 2012, p.128)

Finalement, la distribution fortement hiérarchisée des tailles de centres de peuplement dans un même système est peut-être le fait stylisé le plus universel, le plus connu et étudié :

"Un nombre conséquent de chercheurs, initialement en géographie, a entrepris une série de travaux empiriques pour tester la validité de la loi de Zipf pour les villes, tout en s'interrogeant sur les interprétations théoriques qui en découlent quant à la structuration des systèmes urbains et la localisation des ménages et des firmes. Ces travaux ont permis d'affiner et d'enrichir les connaissances sur les hiérarchies urbaines, en multipliant les terrains d'études, en proposant des comparaisons internationales ou diachroniques, en utilisant de multiples définitions statistiques de la ville, en testant différentes méthodes d'estimation pour limiter les biais d'échantillonnage. Néanmoins, ils ne permettent pas de dégager une vision unanime sur la loi rang-taille, qualifiée de façon controversée de *mystère urbain* par Krugman (1996) et d'*illusion statistique* par Henderson (1996) ; elle reste, ainsi *un des faits les plus frappants en sciences sociales contemporaines en général* (GABAIX et IOANNIDES, 2004)."

(SCHAFFAR, 2012, p.5-6)

1.1.2 Des interprétations pour cette structure des systèmes de peuplement fortement hiérarchisée

De par le fait de son universalité, l'explication de la distribution rang-taille suscite de nombreuses réflexions. Les interprétations prennent des formes diverses et les stratégies pour l'explication sont multiples. SANDERS (2012, p.130) distingue ainsi plusieurs niveaux d'abstraction dans les interprétations de la loi rang-taille :

- Des explications contextuelles : Elles permettent de donner du sens à une forme de distribution, à la différence de forme entre différents systèmes de peuplement ou d'un même système à différentes périodes de temps observées, par le truchement d'une argumentation fondée sur la connaissance du contexte précis du territoire étudié. Ces explications peuvent prendre en compte l'effet d'événements ou d'évolutions d'organisation sociale du territoire sur la structure ou l'évolution de la distribution rang-taille du système. Ainsi dans le cadre de ces interprétations, l'étude de sa forme et de son évolution offrent des clés pour la compréhension du développement de sociétés (LIU, 1996 ; DRENNAN et PETERSON, 2004) : par exemple, G. Jonhson (1981, cité par (LIU, 1996)) a étudié l'évolution de la courbe rang-taille entre 3800 et 3400 ans avant J.C. des peuplements de la région de la plaine Susiana dans le sud-ouest de l'Iran, et souligne des relations précises entre des changements de

la structure de la courbe rang-taille et des changements d'organisation politique. Cependant ces explications, très riches du point de vue thématique, ont un fort risque de sur-interprétation (SANDERS, 2012) et sont contestées (BERRY, 1961 ; PEARSON, 1980). En effet les études systématiques sur les distributions des tailles de peuplement et leurs contextes sociaux, économiques ou politiques montrent que les relations de causalité ne sont pas évidentes à énoncer (BERRY, 1961 ; MORICONI-EBRARD, 1993). BERRY (1961) souligne la multiplicité des causes conduisant à une forme de distribution rang-taille, et insiste sur la nécessité de la prise en compte de plusieurs forces opérant simultanément plutôt que de proposer des causes uniques.

- Des explications systématiques : Ces explications font référence à une théorie (BERRY, 1961) qui fait le lien entre la forme de distribution rang-taille et le *niveau d'intégration* du système de peuplement. Elles prennent comme référence la distribution de Zipf ou log-normale. Ces distributions sont générées par les modèles de GIBRAT (1931) ou SIMON (1955) sous des hypothèses de taux de croissance indépendants de la taille des villes et non auto-corrélés (c.f. section 2.1.2), conditions qui ne pourraient être rencontrées que dans des systèmes très intégrés dans lesquels les échanges inter-entités seraient les plus nombreux possibles. Le niveau d'intégration d'un système fait donc référence au niveau de *fluidité* dans les échanges (dont la nature diffère d'une application à l'autre) entre les entités du système. La distribution de référence correspond à des systèmes dans lesquels les forces qui agissent sur la distribution sont nombreuses et jouent de façon aléatoire, comme c'est le cas pour des systèmes de grande taille, anciennement urbanisés, ou pour des systèmes économiques ou politiques complexes. Au contraire, les autres formes de distribution, primatale (c'est-à-dire concaves, dans lesquelles les tailles des plus grandes villes sont plus grandes qu'attendues) ou au contraire convexe (dans lesquelles les tailles des plus grandes villes sont plus petites qu'attendues), reflèteraient des situations où les forces en jeu sont moins nombreuses. Elle correspondraient à des systèmes plus petits, plus récemment urbanisés ou encore présentant un système économique ou politique plus simple. Ces interprétations sont très critiquées et la fiabilité de la théorie est largement mise en doute : la France, 5^e puissance économique mondiale en 2010, n'a-t-elle pas un système primatial ?
- Des explications génériques : Elles se fondent sur le constat qu'une très grande diversité de situations sociales, économiques ou politiques correspondent à des distributions rang-taille très similaires. Ainsi plusieurs auteurs défendent l'idée de trouver une explication générique, beaucoup plus générale des structures fortement hiérarchisées, qui serait valide pour des systèmes aussi différents. Il existerait un processus sociologique sous-jacent qui serait commun à tous ces systèmes de peuplement (GROVE, 2011 ; PUMAIN, 2006). Plusieurs théories s'opposent sur le sujet : la forte

régularité des distributions des tailles de villes serait-elle due à un processus de croissance purement aléatoire (GIBRAT, 1931 ; SIMON, 1955) ? Ou existerait-il des fondements socio-économiques, tels que les rendements d'échelle ou les interactions interurbaines, qui produiraient à long terme les mêmes effets ? Nous parlerons très largement de la recherche de ce processus dans le deuxième chapitre.

1.1.3 Un processus de hiérarchisation croissante

La compilation de base de données sur l'évolution des tailles de villes sur le long terme, tel que l'ont fait DE VRIES (1984) ; BAIROCH, BATOU et CHEVRE (1988) ou encore le programme Harmonie-cités (BRETAGNOLLE, GUÉROIS et al., 2011) permettent de mesurer l'évolution de la structure de la distribution des tailles de villes. Des comparaisons diachroniques sur le long-terme et dans plusieurs régions du monde ont mis en évidence que le degré de hiérarchisation, mesuré par le paramètre d'estimation de la pente a , tend à augmenter avec le temps. Cela signifie que l'inégalité entre les tailles de villes s'accroît par l'effet de la concentration progressive de la population dans les plus grosses villes de la hiérarchie.

Les travaux sur l'évolution des tailles de villes sur plusieurs siècles en Europe de DE VRIES (1984) montrent que le coefficient de la pente d'ajustement linéaire proche de 0,7-0,8 avant le XIX^e siècle tend vers des valeurs plus grandes (de 0,9 à 1 ou plus) pour des distributions observées après la moitié du XX^e siècle (DE VRIES, 1984, p.93-100). Cette évolution de la hiérarchisation n'est cependant ni régulière dans le temps, ni dans l'espace. La comparaison entre 1600 et 1700 de l'évolution des deux sous-systèmes de villes européens montre des histoires de hiérarchisation différentes : alors que les villes de l'Europe du Nord présentent un processus de hiérarchisation très fort (de 0,62 à 0,77 en 100 ans), la hiérarchisation des villes méditerranéennes, déjà bien marquée, stagne autour de 0,85 (DE VRIES, 1984, p.98). Par ailleurs, l'évolution de la pente de la distribution rang-taille de toute l'Europe de 1500 à 1950 présente des épisodes de stagnation et d'accélération avec cependant un marqueur évident, la Révolution Industrielle (DE VRIES, 1984, p.98). GUÉRIN-PACE et PUMAIN (1990, p.10) donnent un graphique (c.f. figure 1.1) de l'évolution de la pente de l'ajustement sur 150 ans du système de villes français. Les travaux de A. Bretagnolle et ses collègues (BRETAGNOLLE, GUÉROIS et al., 2011) sur les systèmes de villes européen, étasunien, indien et sud-africain permettent d'étudier les évolutions plus récentes de la hiérarchisation dans ces systèmes de villes. BRETAGNOLLE, PUMAIN et VACCHIANI-MARCUZZO (2009) présentent un tableau de l'évolution de la pente d'approximation linéaire de la distribution rang-taille (c.f. tableau 1.1). D'après ce tableau, le degré de hiérarchisation augmente pour ces systèmes urbains (à l'exception de l'Afrique du Sud, ce qui peut être expliqué par l'établissement tardif du système), et met en évidence un processus d'accroissement des inégalités et de concentration progressive de la

	1900	1950	2000
Europe	0,74(1850)	0,91	0,94
Inde	0,76	0,86	0,99
États Unis	0,97	1,15	1,20
Afrique du Sud	1,39	1,16(1960)	1,19

Tableau 1.1 – Évolution (1900-2000) de la hiérarchisation des systèmes de villes européen, indien, étasunien et sud-africain (BRETAGNOLLE, PUMAIN et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009, p.215)

population dans les grandes villes.

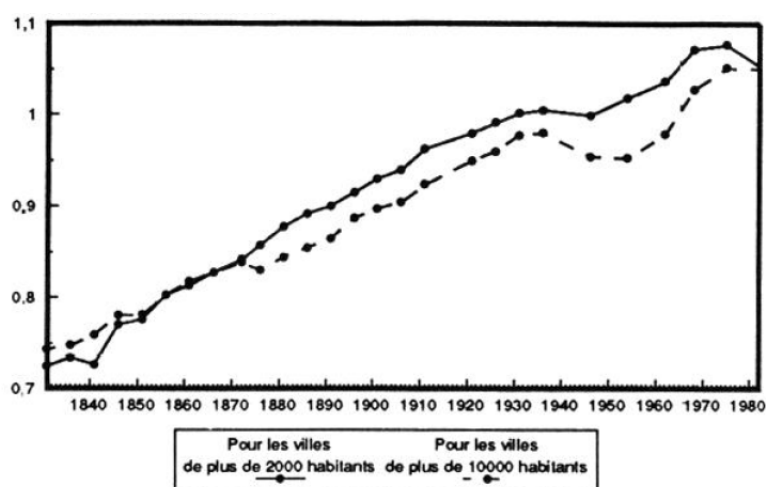


Figure 1.1 – Évolution de la pente de la droite d'ajustement de la distribution rang-taille du système de villes français entre 1831 et 1982 (GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990, p.10)

Cependant ces chiffres semblent montrer un relatif ralentissement du processus de hiérarchisation pour les pays anciennement industrialisés, ce que certains analysent comme un signe de ralentissement et de fin de ce processus dans les pays en fin de transition urbaine (la *counter-urbanization* de B. Berry). Mais BRETAGNOLLE, PAULUS et PUMAIN (2002) mettent en évidence que le choix du critère de délimitation des villes dans lesquelles comptabiliser la population a une grande influence sur les résultats des ajustements de la pente de la distribution rang-taille. Ils ont ainsi testé l'effet d'une délimitation qui prend en compte l'étalement urbain et la péri-urbanisation, c'est-à-dire qui prend en compte les espaces que les villes polarisent peu à peu via l'évolution des vitesses de transport. Ces délimitations, au contraire de la simple agglomération, donnent une définition plus fonctionnelle de la ville grâce à la notion d'aires urbaines. Si ces délimitations fonctionnelles sont prises en compte, alors la tendance vers une concentration encore plus inégalitaire reste stable (c.f. figure 1.2).

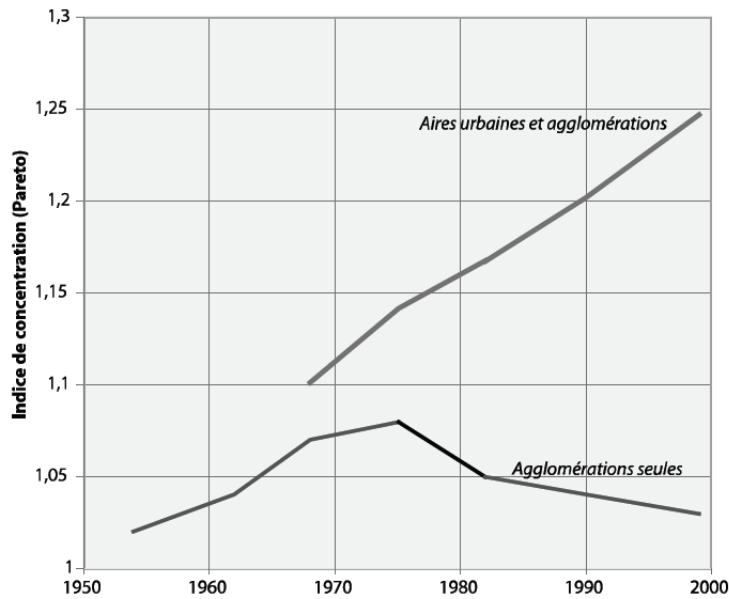


Figure 1.2 – Évolution (1954-1999) de la pente d’ajustement de la distribution rang-taille des villes françaises selon deux méthodes de définition des délimitations de la ville, *source : INSEE-Recensement de la population et Ph. Julien (BRETAGNOLLE, PAULUS et PUMAIN, 2002)*

Cette hiérarchisation du système de peuplement, qui implique une concentration de plus en plus marquée de la population dans les grandes villes, devrait se traduire quantitativement dans la distribution des taux de croissance urbains. Ces taux de croissance favoriseraient alors les grandes villes. Cependant les travaux sur les distributions des taux de croissance à des époques récentes ont du mal à la mettre en évidence. En France et de façon globale, il n’y a pas de corrélation entre les taux de croissance et les tailles de villes pour les 50 dernières années (PAULUS, 2004 ; PAULUS et al., 2006), sinon une très très faible corrélation positive sur les 150 dernières années (GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990 ; GUÉRIN-PACE, 1993). Ce minuscule avantage sélectif pourrait expliquer un processus de hiérarchisation. Une analyse des trajectoires des aires urbaines françaises sur les 50 dernières années permet de confirmer ce constat. Une analyse détaillée de la typologie issue d’une classification ascendante hiérarchique (avec distance du χ^2 sur les populations des 354 aires urbaines à sept dates) des courbes d’évolution de la population des aires urbaines entre 1954 et 1999 montre la tendance au renforcement des inégalités entre les tailles de villes (c.f. figure 1.3)(PAULUS, 2004, p.150) : *"Au-dessus de 50 000 habitants, les aires urbaines sont nettement sur-représentées dans les types à croissance forte ou modérée, tandis qu’au contraire les plus petites y sont en général sous-représentées. Les petites villes sont sur-représentées dans les types en déclin relatif ou absolu, tandis que les grandes (à l’exception des nébuleuses industrielles du nord et du nord-est) y sont sous-représentées. Le test du χ^2 appliqué au tableau confirme une dépendance très significative*

entre taux de croissance et classe de taille des villes".

Classes de taille des aires urbaines (Nombre d'hab.)		Types d'évolution des aires urbaines						
Nombre d'aires urbaines	% en ligne	1 - Croissance très forte	2 - Croissance forte	3 - Croissance modérée	4 - Maintien	5 - Déclin relatif	6 - Les oubliées de la croissance	Ensemble
Plus de 160 000		3 6,1	12 24,5	14 28,6	14 28,6	2 4,1	4 8,2	49 100
De 8000 à 160 000		1 2,0	5 10,2	11 22,5	14 28,6	18 36,7	0 0,0	49 100
De 40 000 à 80 000		4 6,0	7 10,5	18 26,9	14 20,9	18 26,9	6 9,0	67 100
De 20 000 à 40 000		4 4,4	5 5,5	13 14,3	19 20,9	40 44,0	10 11,0	91 100
Moins de 20 000		8 8,2	7 7,1	15 15,3	19 19,4	31 31,6	18 18,4	98 100
Ensemble		20 5,7	36 10,2	71 20,1	80 22,6	109 30,8	38 10,7	354 100

Figure 1.3 – Répartition des aires urbaines selon leur type d'évolution et leur taille en 1999, source : INSEE-Recensement de la population (PAULUS, 2004, p.150)

La hiérarchisation du système de peuplement trouve sa cause dans plusieurs types de processus spatiaux que nous détaillerons dans la suite de ce chapitre : l'inégalité des interactions spatiales, l'émergence et la diffusion spatiale des innovations, la contraction de l'espace-temps.

1.1.4 La répartition spatiale des centres de peuplement

A la distribution statistique des tailles de centres de peuplement, s'ajoute un deuxième fait stylisé depuis longtemps remarqué : la forte régularité de l'espacement des centres de peuplement. La trame urbaine présente des éloignements presque égaux entre les villes de même taille et les espacements entre les plus grandes villes (moins nombreuses) sont plus grands que les espacements entre les plus petites villes.

La théorie des lieux centraux, décrite par CHRISTALLER (1933), mais dont les grandes hypothèses directrices ont aussi été théorisées par J. Reynaud en 1841(cité par (PUMAIN et ROBIC, 1996 ; BRETAGNOLLE, 1999)) et par LOESCH (1940), propose une explication au nombre, à la taille et à l'espacement des villes. Cette théorie se fonde sur la dualité entre les villes, c'est-à-dire les lieux de centralisation des biens et des services, et le reste du territoire où réside la population et de laquelle émane la demande. Cette clientèle n'est pas extensible à l'infini car le coût de transport (en monnaie ou temps), qui est pris en charge par le client, s'ajoute à celui du bien ou du service. Avec la distance au centre, ce coût

augmente et devient dissuasif comparé à l'attrait d'un produit. Se définit ainsi une *portée maximale* pour chaque type de bien ou de service au-delà de laquelle le client ne se déplace plus pour se le procurer. À cette condition s'ajoute la rentabilité d'une offre de service qui augmente par économie d'échelle. La localisation d'une offre est déterminée par le *seuil d'apparition* qui est fixé par le volume de clientèle nécessaire à sa rentabilité. Ce seuil d'apparition est d'autant plus grand que l'offre est rare ou d'usage peu fréquent. Le jeu entre les portées maximales et les seuils d'apparition détermine plusieurs *niveaux* d'offre. Le principe de centralité se justifie par les économies d'agglomération. Ces économies sont bénéfiques à la fois aux consommateurs et aux fournisseurs grâce au regroupement en un même lieu de l'offre de même niveau. Les centres sont ainsi hiérarchisés et leurs zones d'influence sont emboîtées, car les centres de niveau supérieur offrent généralement tous les services de portée inférieure. La concurrence entre les centres et la rationalité du consommateur (qui fréquente le lieu le plus proche) a pour conséquence une régularité de l'espacement des villes, et la hiérarchie des niveaux de services se traduit par un nombre plus petit et un espacement plus important des centres lorsqu'on s'élève dans la hiérarchie. La théorie des lieux centraux exprime un principe d'organisation sous des hypothèses strictes (de répartition homogène de l'offre, de concurrence parfaite, de libre circulation, etc.), mais différents types d'organisation peuvent émaner suivant les conditions que l'on considère (principe de marché, principe de transport, principe d'administration). Cette théorie a été appliquée à de nombreux cas et sert de référence pour étudier la distribution spatiale de centres de peuplement (CAUVIN, REYMOND et HIRSCH, 1985). La figure 1.4 montre la diversité des cas d'application, autant dans les localisations que dans les époques des systèmes de lieux centraux étudiés.

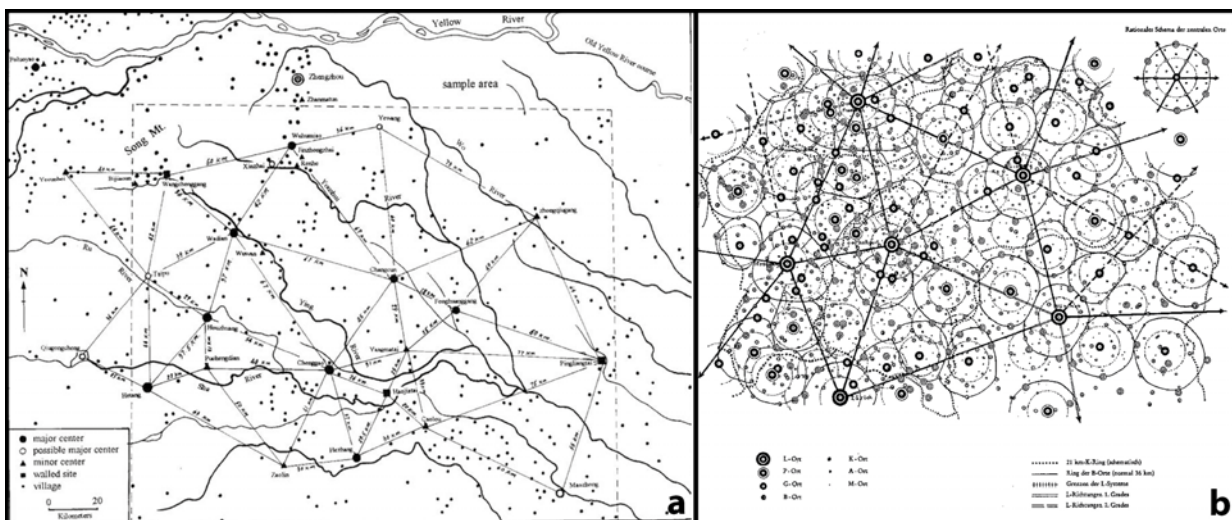


Figure 1.4 – Application de la théorie des lieux centraux à des cas historiques d'organisation spatiale de systèmes de peuplement : a. Sites néolithiques de Longshan, centre du Henan, Chine (LIU, 1996), b. Système de villes d'Allemagne du sud en début du XX^e siècle (CHRISTALLER, 1933)

La théorie des lieux centraux rencontre plusieurs critiques (PUMAIN, 2004b). Il y a celles qui remettent en cause les hypothèses de la théorie. Si l'on réfute par exemple le choix du centre le plus proche pour chaque niveau d'offre, le modèle hexagonal de Christaller est mis à mal. Par ailleurs certaines fonctions urbaines très spécialisées (fonction portuaire, fonction d'exploitation d'une ressource locale ou fonction de défense par exemple) échappent au principe de la théorie des lieux centraux. Une autre critique revient sur la compatibilité entre le modèle des lieux centraux et la loi rang-taille qui produisent deux modèles différents pour la distribution des tailles de villes. D'un côté la loi rang-taille décrit une distribution continue et régulière des tailles alors que de l'autre la théorie des lieux centraux décrit une distribution au sein de laquelle tous les centres de même niveau hiérarchique ont la même taille, c'est-à-dire une distribution par paliers. La première est descriptive et fondée sur l'analyse empirique alors que la deuxième est de nature beaucoup plus théorique mais explicative. Certains travaux ont cherché à rapprocher ces deux descriptions pour garder l'explication offerte par la théorie des lieux centraux tout en gommant le caractère trop systématique de la distribution des tailles de villes qu'elle génère. Cependant PARR (1970) montre que ces travaux ne sont pas convaincants : parmi la diversité des formes de hiérarchie rendant compte des différentes applications du principe d'organisation de la théorie des lieux centraux, peu sont compatibles avec une distribution rang-taille. Il conclut sur la supériorité du modèle de distribution rang-taille sur la théorie des lieux centraux comme critère de validation des modèles de hiérarchisation des systèmes de peuplement :

"The fact that all realistic rank-size distribution contain acceptable underlying hierarchical structures but not all acceptable hierarchical structures are capable of forming the basis for rank-size distribution suggests that the rank-size distribution has a greater validity, particularly if the empirical evidence is taken into account. For this reason, compatibility with the rank-size distribution might be considered as a further test in the evaluation of a hierarchical model of city sizes."

(PARR, 1970, p.246)

1.2 Les interactions spatiales urbaines

Avec la *nouvelle géographie* à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle et l'abandon du particularisme est arrivée une nouvelle appréciation de la géographie qui la définit comme "*une science des interactions spatiales*" (ULLMAN et BOYCE, 1980). Les relations entre les lieux sont au centre des études et de l'explication scientifique pour comprendre l'évolution des lieux. La nouvelle géographie, et la géographie contemporaine qui en découle, s'attache à l'analyse des échanges, des flux, des déplacements à partir d'une réflexion théorique et modélisatrice de l'effet de la distance relative et de la nature des relations entre deux lieux. La première loi de la géographie, telle que l'a énoncée W. Tobler, postule l'existence de relations entre la distance séparant les lieux et l'intensité de leurs échanges : "*Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*" (TOBLER, 1970).

1.2.1 Modélisation des échanges entre les villes par les effets de la distance et de la taille : le modèle gravitaire

Les travaux sur les flux migratoires ou les fréquentations commerciales ont très vite mis en évidence des lois empiriques : l'intensité des flux est inversement proportionnelle à la distance et dépend des masses, i.e. des capacités émettrices et réceptrices des lieux (en nombre d'habitants, en part de marché, en capital économique, en nombre d'emplois, etc.) des entités géographiques considérées (ville, région, pays, etc.) (RAVENSTEIN, 1885). Une analogie avec la loi universelle de la gravitation a très vite été formalisée. Cette loi, telle que l'a définie Newton en 1686, établit que la force d'attraction entre deux corps est proportionnelle au produit de leur masse et inversement proportionnelle au carré de la distance les séparant. En s'appropriant cette loi, la géographie transpose la notion de force d'attraction entre deux corps pouvant influencer leur trajectoire à la notion d'intensité d'interaction suscitant un flux d'échange entre zones géographiques et a construit un modèle de référence, le modèle gravitaire (RAVENSTEIN, 1885 ; REILLY, 1931 ; ZIPF, 1949 ; TOBLER, 1970 ; STEWART, 1947). BRETAGNOLLE (2009) décrit dans un encadré les étapes du transfert de ce modèle depuis la physique vers la géographie. Ainsi, selon le modèle gravitaire l'intensité des interactions F_{ij} entre les lieux i et j est proportionnelle au produit des masses M_i et M_j et inversement proportionnelle à la distance d_{ij} qui les sépare :

$$F_{ij} = k.M_i.M_j.d_{ij}^{-a}$$

Le paramètre k , qui met en relation le volume des flux avec les masses, dépend de la mobilité des éléments échangés, le paramètre a représente la difficulté de franchissement (ou frein) de la distance : toutes choses égales par ailleurs, plus sa valeur est grande et moins il y a d'échanges pour une distance donnée. Alors que dans le modèle de Newton,

ces paramètres sont fixes, les applications géographiques cherchent justement à estimer les valeurs spécifiques de ces paramètres pour modéliser l'intensité des échanges entre deux lieux :

- soit pour les expliquer, ce sont alors les écarts au modèle (qui présuppose proportionnalité des échanges et homogénéité de l'espace) qui sont instructifs et qui permettent de mettre en évidence des effets de barrière physique ou sociologique (comme une frontière) ou des effets de préférence (comme des canaux préférentiels par exemple liés aux filières de migration) sur les échanges ;
- soit pour les prévoir, ce qui présuppose de connaître les estimations des deux paramètres ou de faire des hypothèses sur les conditions de mobilité et sur l'effet dissuasif de la distance.

Cependant, rien n'indique que la fonction de frein avec la distance soit toujours de la forme Pareto ou exponentielle négative comme indiqué dans la première formule. Dans la littérature géographique et économique, et si l'on ne prend pas en compte explicitement les effets de frontière ou de contrainte, la fonction de frein de la distance prend généralement deux grandes formes (TAYLOR, 1971 ; POULAIN, 1981) :

- Puissance négative ou Pareto :

$$F_{ij} = k.M_i.M_j.d_{ij}^{-a}$$

- Exponentielle négative :

$$F_{ij} = k.M_i.M_j.exp^{-a.d_{ij}}$$

Le choix de l'utilisation de l'une ou l'autre dépend du comportement recherché de l'effet de distance sur l'intensité des relations. Il a été maintes fois montré que la fonction Pareto surestime généralement les flux à courte distance tandis que la fonction exponentielle négative tend à les sous-estimer (TAYLOR, 1971 ; POULAIN, 1981). Si on compare les comportements de ces deux fonctions (c.f. figure 1.5) toutes choses égales par ailleurs, on comprend que :

- l'ajustement des flux par une fonction puissance négative est adapté quand l'effet de la distance a tendance à être plus fort sur les courtes distances, et plus faible sur les grandes distances ;
- tandis que l'ajustement des flux par une fonction exponentielle négative est adapté quand l'effet de la distance a tendance à être plus faible sur les courtes distances, et plus fort sur les grandes distances.

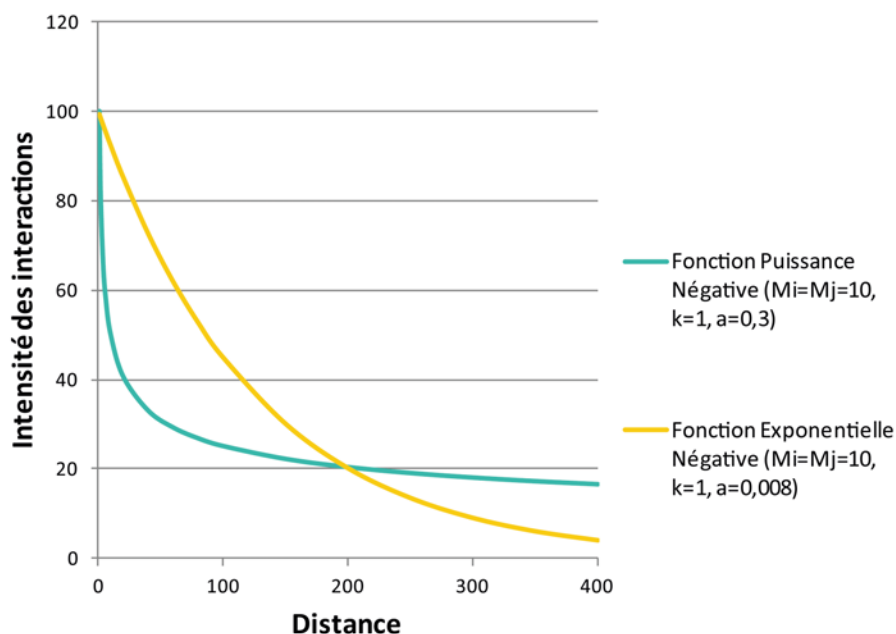


Figure 1.5 – Variation de l'intensité des interactions en fonction de la distance suivant deux fonctions de frein de la distance

Le modèle statique que représente le modèle gravitaire est devenu le modèle de référence en géographie :

"D'après maintes observations, le modèle gravitaire résume de manière très satisfaisante la configuration des flux dans l'espace géographique, et cela pour une très grande diversité de déplacements ou d'échanges. Il trouve des quantités d'applications, non seulement dans le domaine de la géographie des transports, du commerce, des villes, mais aussi en aménagement du territoire, à des échelles aussi bien locales que planétaires. Il a des conséquences tellement importantes qu'il intervient dans l'explication de presque toutes les structures spatiales (par exemple, centre-périphérie) ou les processus spatiaux (par exemple, la diffusion spatiale)."

(PUMAIN et SAINT-JULIEN, 2010, p. 26-27)

Les villes ont des masses très inégales du fait de leur différenciation hiérarchique, et le modèle gravitaire est particulièrement adapté à la description et à la prévision des flux qu'elles échangent. Les travaux empiriques sur les interactions spatiales montrent qu'il existe des échanges entre les lieux, entre les villes, qui se traduisent par des flux de personnes, de capitaux, de marchandises, de monnaie, d'idées, de techniques. Ces flux sont bien modélisés par des modèles gravitaires, qui postulent que leur direction et leur intensité dépendent à la fois de la distance séparant les lieux concernés mais aussi de la masse qu'ils représentent dans le système (en termes économiques, démographiques,

politiques, etc.) (DORIGO et TOBLER, 1983 ; TOBLER, 1995 ; D'AUBIGNY et al., 2000 ; BERROIR et al., 2005 ; LE TEXIER et CARUSO, 2013, à paraître)

1.2.2 Les modèles de situation : le potentiel

Les modèles d'interaction spatiale et plus spécifiquement la modélisation par la loi gravitaire ont trait à l'étude des flux entre lieux. Mais une autre application des hypothèses de la loi gravitaire (échanges proportionnels aux capacités émettrices et réceptrices des lieux, diminution de l'intensité des échanges avec la distance) permet de modéliser la position relative d'un lieu par rapport aux autres grâce au calcul d'un potentiel qui quantifie "*les variations de la quantité d'opportunités de relation*" de ce lieu avec les autres (GRASLAND, 2004). Ce potentiel peut se traduire par l'attractivité que ce lieu exerce sur les autres ou son accessibilité depuis tous les autres lieux du système. On parle alors de modèle de position. Il a pour formule générique :

$$V_i = \sum_{j=1}^N M_j \cdot F(T_{ij}, \alpha)$$

avec V_i , le potentiel du lieu i , M_j la masse du lieu j (en nombre d'emplois, en valeur du produit intérieur brut, en population, etc.), F une fonction de frein avec la distance de variable T_{ij} le temps ou le coût de transport effectif entre i et j , et de paramètre α de friction à la distance. Le calcul de ces potentiels a été employé pour calculer les aires théoriques de marché d'un ensemble de lieux centraux (REILLY, 1931 ; HUFF, 1964), la localisation optimale de centres en fonction de la localisation des consommateurs (STEWART, 1947), ou encore évaluer les variations d'accessibilité sur les potentiels économiques des lieux (DE VRIES, 1984 ; DUNDON-SMITH et GIBB, 1994 ; GUTIERREZ, 2001).

C'est en utilisant un modèle de potentiel que DE VRIES (1984) (cité par BRETAGNOLLE (2009)) a réussi à tester l'hypothèse de F. Braudel sur l'explication du basculement entre le XVI^e siècle et le XVII^e siècle du centre de l'économie mondiale depuis les villes méditerranéennes aux villes de la mer du Nord. Ce basculement aurait été provoqué par l'ouverture du nord de l'Europe sur le reste du monde grâce aux grandes découvertes. En effet les variations des valeurs du potentiel d'interaction de ces villes sont très corrélées aux variations de croissance urbaine observées.

1.2.3 La diffusion des innovations

Les interactions spatiales interurbaines ont largement été étudiées grâce aux recherches empiriques et aux travaux de modélisation des flux d'échange entre les lieux, il en va de même avec les processus de diffusion spatiale qui accompagnent les interactions spatiales.

SAINT JULIEN (1985, p.5) le définit comme : "*le phénomène de propagation dans le temps et dans l'espace d'une chose spécifique, objet, institution, idée, pratique, etc., auprès des individus, des groupes ou de toutes unités d'accueil très précisément localisées*". Dans la littérature des sciences sociales, cette *chose spécifique*, qu'elle soit matérielle ou immatérielle, est associée à la notion d'innovation. Le terme d'innovation prend dans une acceptation faible le sens de la chose nouvelle qui est adoptée socialement et qui apparaît dans un lieu pour la première fois. Dans une acceptation forte, l'innovation a la propriété de modifier le *milieu* dans lequel elle est introduite et plus l'innovation est complexe plus son adoption engendre des modifications irréversibles (PUMAIN et SAINT-JULIEN, 2010). C'est pour cette raison que les processus de diffusion spatiale des innovations sont une composante essentielle de la structuration dynamique des espaces géographiques.

L'étude de la diffusion des innovations a été introduite en géographie avec les travaux pionniers de Hägerstrand au début des années 1950. À partir de l'étude de cas de diffusion d'innovation en Suède (notamment de diffusion de pratiques agricoles), il met en évidence l'existence de régularités spatio-temporelles des processus de diffusion spatiale et pourquoi elles sont une composante importante de la structuration de l'espace géographique (HÄGERSTRAND, 1952 ; HÄGERSTRAND, 1953). Il existe plusieurs canaux empruntés pour la diffusion. Le contact reste le canal privilégié, on parle alors de diffusion par expansion. À partir d'un foyer émetteur, l'innovation se diffuse de proche en proche, en *tache d'huile*. Dans ces formes de diffusion, la distance entre l'émetteur et le récepteur joue un rôle essentiel : plus la distance est grande, plus la probabilité de contact et donc de diffusion est faible. Cependant le rôle de la distance est complexe car la proximité entre l'émetteur et le récepteur ne se mesure pas forcément en distance physique mais peut être plus pertinente par la mesure des distance-temps, des distances perçues ou des distance-coûts. C'est à travers ces notions de proximité que l'on comprend le rôle des réseaux de transport ou de relations sociales dans les processus de diffusion. Le deuxième canal de diffusion est celui de la hiérarchie. En effet de nombreux travaux ont montré que dans beaucoup de cas la diffusion des innovations emprunte la voie descendante de la hiérarchie des lieux centraux (HUDSON, 1969 ; ROBSON, 1973 ; PRED, 1975). Les grands centres, qui concentrent un grand nombre de récepteurs possibles et donc qui concentrent les probabilités d'interaction et d'adoption, sont de grands foyers d'adoption rapide et massive d'innovation. Par ricochet, la masse de récepteurs adoptants devient émettrice, conférant au lieu central une grande capacité d'émission vers des lieux moins susceptibles, car rassemblant moins de récepteurs potentiels ou étant plus éloignés. La diffusion hiérarchique procède donc par saut de grandes distances du fait des inégales capacités d'adoption des centres. Les deux canaux, par propagation de proche en proche et par diffusion hiérarchique ne sont pas incompatibles, ils concernent généralement différents types d'objets. Il faut noter que des effets de barrière, de nature physique, politique, sociale, etc. peuvent freiner et même empêcher la diffusion. La formalisation de ces deux canaux de diffusion met en évidence

les mêmes hypothèses sur la diffusion des innovations que celles de l'application de la loi gravitaire : le jeu de la distance mais aussi des masses des lieux sur les échanges. Cette loi a ainsi été utilisée lors de modélisations de diffusion spatiale d'innovations (HUDSON, 1969 ; ROBSON, 1973 ; PRED, 1975).

Les études de la diffusion des innovations dans le temps ont montré de grandes régularités qui permettent de définir des étapes de la diffusion (HÄGERSTRAND, 1952 ; HÄGERSTRAND, 1953). Si l'on représente par un graphique l'évolution du nombre d'adoptants en fonction du temps, on observe généralement des courbes en S (ou logistiques) qui traduisent des évolutions dans le rythme d'adoption de l'innovation. Au stade primaire, la diffusion est lente, les adoptants sont encore peu nombreux et/ou isolés. Le rythme d'adoption s'accélère ensuite avec l'augmentation du nombre d'adoptants, ce qui définit l'étape d'expansion. Suit l'étape de condensation pendant laquelle le processus ralentit, plus de la moitié des récepteurs potentiels ont adopté l'innovation. À saturation, la majorité des adoptants potentiels ont été touchés, le processus de diffusion touche à sa fin.

1.2.4 Les interactions dans la dynamique des villes

L'utilisation du modèle gravitaire et surtout son analogie avec le modèle newtonien ne constitue pas en soi une explication géographique (PUMAIN et SAINT-JULIEN, 2010, p. 27), le but de l'emploi de ces modèles n'est pas d'expliquer la complexité des comportements humains dans les processus spatiaux mais d'estimer les effets de ces comportements spatiaux : le modèle permet de bien décrire les comportements sans pour autant utiliser des variables explicatives de ces comportements. On peut comprendre la pertinence du modèle mathématique qui prend en compte les masses si l'on considère qu'elles représentent les probabilités conditionnelles pour un élément de i d'interagir (ou d'échanger sa localisation) avec un élément de j . Dans cette perspective, le produit des masses, comptées en population, représente donc une quantité de référence pour le nombre d'interactions possibles entre les individus de i et de j deux à deux, le paramètre k régule la probabilité/réurrence de ces interactions deux à deux. Le rôle de la distance sur les interactions s'interprète plutôt par les comportements des individus (processus économiques, sociologiques ou cognitifs) (GRASLAND, 2004). La diminution de l'intensité des interactions avec la distance peut s'expliquer d'une part par le coût (économique, en temps, etc.) qu'implique son franchissement (principe du moindre effort de Zipf), mais aussi parce qu'elle représente un élargissement considérable du nombre des interactions potentielles autour d'un lieu donné : plus la distance augmente et plus le nombre d'occasions interposées est grande (Stouffer), et plus la distance est grande et plus le flux d'information sur un lieu éloigné est faible, la décroissance des migrations avec la distance est liée à l'ignorance des migrants (Hägerstrand). Ainsi, les effets de masse et de distance, bien qu'ils ne soient pas explicatifs des processus sociologiques sous-jacents, permettent de très bien résumer les

échanges à l'échelle de la ville et du système de villes. À taille équivalente, les échanges entre deux villes proches seront plus nombreux qu'entre deux villes éloignées ; et de la même façon, à distance équivalente, les échanges entre deux grandes villes seront plus nombreux qu'entre deux villes plus petites. Ces effets permettent de mieux appréhender les rapports qu'entretiennent les villes les unes avec les autres, et ainsi de modéliser la place ou le poids relatif d'une ville dans le système.

Les travaux empiriques sur les interactions spatiales montrent que les modèles gravitaires sont de bonnes approximations des échanges observés. Cependant, si le modèle gravitaire dans sa formule mathématique traduit la symétrie quantitative des échanges, il ne prend pas en compte les observations souvent faites d'asymétries comme celles relevées par RAVENSTEIN (1885) à propos de l'exode rural, ou entre des classes de taille de villes sur des périodes plus récentes. En 1885, E. Ravenstein formula les *lois de la migration*. Ces lois déclarent notamment que les migrations (à longue distance) se dirigent préférentiellement vers les grands centres industriels ou de commerce et que la majorité des migrations s'effectuent depuis les zones rurales vers les centres industriels ou de commerce. Par le jeu de ces effets dissymétriques, on comprend comment les migrations entre les villes peuvent contribuer au processus de concentration de la population dans les plus grandes villes et de hiérarchisation accrue du système de villes. Ces effets sont à la base de modèles de hiérarchisation de systèmes de villes (WILSON, 1969 ; WHITE, 1978 ; WEIDLICH et HAAG, 1988) que nous verrons dans le deuxième chapitre. Ces effets, s'ils ont été très clairs pendant l'exode rural, sont de moins en moins visibles dans les études quantitatives :

"Au cours du processus d'urbanisation, les migrations entre les villes contribuent au mouvement de concentration de la population dans les plus grandes villes et de hiérarchisation accrue du système des villes, du fait de leur distribution par étapes, et de soldes migratoires positifs des catégories de villes les plus grandes à l'égard des catégories de taille inférieure. D'abord vraie pour les migrations de la population totale, cette configuration se restreint par la suite, lorsque le processus d'urbanisation entre dans sa phase de saturation, à la population active, mais ce processus de sélection selon la hiérarchie urbaine se maintient de manière très significative. Avec la fin de l'exode rural, ce sont les migrations entre les villes qui peu à peu contribuent à la croissance différentielle de la population des villes. En effet, alors que les taux d'accroissement naturel entre les villes tendent à s'égaliser, les soldes migratoires, tout en contribuant de plus en plus faiblement à la croissance urbaine, demeurent très inégaux et ont donc des effets sélectifs. Ces effets sont d'ailleurs plus importants sur le plan qualitatif que quantitatif."

(PUMAIN, 2003, p.117)

Les modèles gravitaires mais ainsi les divergences empiriques à ces modèles permettent de comprendre et modéliser les formes d'interactions spatiales interurbaines. Ces interactions interurbaines sont les éléments moteurs de la croissance urbaine : ils sont les vecteurs de l'innovation et de sa diffusion.

1.3 Les innovations et la complexification urbaine

Les fonctions urbaines sont l'ensemble des activités économique, politique et culturelle d'une ville. Les liens entre taille des villes et fonctions urbaines ont été depuis longtemps remarqués avec les modèles statiques de W. Christaller et A. Loesch. Plus les fonctions urbaines sont nombreuses et importantes, plus l'aire d'influence de la ville, c'est-à-dire le territoire sur lequel vivent les personnes qui ont recours aux services basés dans cette ville, est vaste. Mais ces modèles théoriques sont fondés surtout sur les fonctions dites *centrales* de type commerce ou service. Des avancées scientifiques récentes vont dans le sens d'une intégration des fonctions non centrales (c'est-à-dire indépendantes de la notion d'aire d'influence) dans l'interprétation de la diversité des tailles mais aussi des types de croissance urbaine. Une nouvelle interprétation dynamique fait maintenant le lien entre taille urbaine, diffusion des innovations et enrichissement des fonctions urbaines.

1.3.1 Les lois d'échelle dans le système de villes

Les lois d'échelle sont des relations mathématiques qui décrivent la variation d'un phénomène en fonction des changements de dimension d'une variable décrivant l'objet étudié. Ce concept est courant dans de nombreuses disciplines. Les économies d'échelle et les rendements décroissants sont des exemples connus de lois d'échelle en science économique. En ingénierie ou en génie civil, ces lois aident à la conception et au dimensionnement de nombreuses constructions : la surface mouillée d'un navire varie avec le carré de la longueur, i.e. plus le navire est grand, plus le ratio surface mouillée (résistance de frottement) sur déplacement (volume, poids) est faible¹. En biologie, des lois d'échelle ont été mises en évidence, typiquement sous la forme de loi puissance : $Y = Y_0.M^\beta$, avec Y une observable, Y_0 et β des constantes et M la masse de l'organisme vivant. Le plus remarquable aspect de ces quantifications est la valeur estimée pour l'exposant β , qui dans la plupart des cas est proche d'un multiple de $1/4$ (WEST et BROWN, 2004). Ainsi, parmi de nombreux exemples, le taux métabolique (i.e. la quantité d'énergie consommée par unité de temps et de masse) des êtres vivants suit une loi puissance d'exposant $3/4$ avec la variation de la masse. Ce constat implique des économies d'échelle dans les consommations d'énergie : plus l'organisme est grand et plus la consommation d'énergie est efficace par unité de temps et de masse (BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al., 2007). Le fait que beaucoup de processus biologiques suivent des lois d'échelle de type $Masse^{\beta/4}$ (le taux cardiaque, l'espérance de vie, etc.) souligne l'effet d'une contrainte commune à toutes les échelles sur le développement des organismes vivants. WEST et BROWN (2004) mettent en évidence le lien avec la structure invariante d'échelle du système de distribution de l'énergie dont les

1. http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_d'echelle

dimensions conditionnent le rythme des processus biologiques. Ainsi les réseaux de distribution d'énergie communs à tous les organismes sont à l'origine d'une théorie biologique qui permet de prédire la structure et la dynamique d'un organisme à partir de sa masse, indépendamment des variations de forme ou d'apparence (WEST, BROWN et ENQUIST, 1997; BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al., 2007).

Les recherches de lois d'échelle en sciences sociales et notamment pour les systèmes urbains sont multiples, de la dimension fractale de la structure urbaine (FRANKHAUSER, 1994; BATTY et LONGLEY, 1994; THOMAS et al., 2010) à la structure en forme de loi puissance de la distribution des tailles de villes (c.f. section 1.1.1). Ce paragraphe se concentre sur les relations entre divers indicateurs observés et la taille démographique des entités de peuplement tel qu'ont déjà pu le faire plusieurs auteurs (BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al., 2007; BETTENCOURT, LOBO et STRUMSKY, 2007; BETTENCOURT, LOBO et WEST, 2009; PUMAIN, 2004c; PUMAIN, PAULUS, VACCHIANI-MARCUZZO et LOBO, 2006; PAULUS, 2004). Comme ils le montrent, la relation mathématique qui lie la taille démographique P d'une ville i à une variable quantitative $Y(i)$ est très souvent de forme puissance :

$$Y(i) = Y_0.P(i)^\beta$$

avec Y_0 une constante de normalisation et β une constante qui traduit l'effet d'échelle de la taille démographique sur la variable observée. Le paramètre β a été quantifié pour de nombreux observables (BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al., 2007, p.7303), et les résultats montrent qu'il existe trois types d'effets d'échelle avec la taille démographique d'une ville :

- $\beta = 1$: des relations linéaires. La quantité de ces observations est proportionnelle à la population (le nombre d'habitations, le nombre d'emplois, etc.). Ces observations correspondent à des "besoins individuels" (BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al., 2007), dans une époque et une société donnée (PUMAIN, 2004c).
- $\beta < 1$ ($\beta \approx 0,8$) : des relations sublinéaires. Ce type d'observations présente donc des économies d'échelle caractéristiques des phénomènes d'optimisation et d'efficacité. Elles correspondent souvent à des quantités d'infrastructures et autres constructions matérielles (comme la longueur de réseaux d'eau courante ou d'égouts par exemple) et se rapprochent de phénomènes de lois d'échelle observés en biologie.
- $\beta > 1$ ($\beta \approx [1, 1; 1, 3]$) : des relations supralinéaires. Elles sont caractérisées par des effets de rendement croissant avec la taille démographique et se rapportent aux observations relatives à l'innovation (en nombre de brevets, taille du secteur R&D, etc.), à la création de richesse (PIB), au niveau de vie (salaires, montant des dépôts en banques, etc.), aux coûts fonciers et immobiliers, peut-être aussi à

la consommation énergétique totale. Ce dernier type d'observation, sans équivalent biologique, reflète la caractéristique des systèmes sociaux à amplifier les produits des interactions, autrement dit à générer des retombées positives (parfois interprétées comme des *spillovers*) de l'interaction sociale.

Ainsi et contrairement aux systèmes biologiques qui ne présentent que des relations d'échelle de type sublinéaire, caractérisées par l'optimisation, les systèmes sociaux urbains semblent présenter deux types de processus antagonistes avec l'augmentation des tailles. D'un côté des économies d'échelle, de type matérielles, montrent l'optimisation des structures avec la taille des villes. De l'autre des processus d'amplifications sont source de création de richesses économiques et intellectuelles, par l'effet de l'augmentation des interactions sociales. BETTENCOURT, LOBO, HELBING et al. (2007) parlent alors de rythme de vie : plus la taille d'une ville est grande et plus le rythme de vie s'accélère (en consommation, en production, en innovation, et même en vitesse moyenne de la marche à pied). Ces résultats aident surtout à comprendre que les grandes villes ne sont pas de simples agrégations de petites villes : ces effets d'échelle non-linéaires mais surtout antagonistes montrent que les petites villes et les grandes villes ne sont pas caractérisées par les mêmes activités, n'ont pas les mêmes fonctions urbaines. C'est sur cette diversité des villes selon leur taille que certains géographes mettent l'accent, ce qui les conduit à proposer une interprétation intégrant aussi le temps dans une théorie urbaine évolutionnaire (PUMAIN, PAULUS, VACCHIANI-MARCUZZO et LOBO, 2006 ; PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009a).

1.3.2 Les cycles d'innovation et la complexification des fonctions urbaines

Le profil économique d'une ville se lit dans la composition des activités économiques présente dans cette ville et la répartition de sa population dans chaque activité. La composition et la structure de chaque profil économique permet de déterminer les fonctions urbaines de chaque ville. De nombreux travaux montrent que les profils économiques des villes sont étroitement liés aux cycles d'innovation et à leur diffusion dans le système de villes (GUÉRIN-PACE, 1993 ; PUMAIN et SAINT-JULIEN, 1978 ; PAULUS, 2004 ; DURANTON et PUGA, 2004 ; FAVARO, 2007). Les travaux de Kondratiev, de Schumpeter puis ceux issus des théories néo-schumpeteriennes mettent en relation les cycles économiques de croissance avec les cycles d'innovations (MENSCH, 1979 ; GLAESER, 1994 ; FREEMAN et LOUÇA, 2001). Selon Schumpeter les innovations sont le seul moyen d'accroître la plus-value et de provoquer une impulsion positive sur l'économie, le progrès technique est donc moteur de l'économie. Les innovations apparaissent "en grappes" : une innovation à l'origine d'un progrès technique majeur, qui est ensuite accompagnée de tout un lot

d'innovations et de développements qui lui sont reliés. Les cycles économiques s'articulent autour des "révolutions" techniques majeures et s'inscrivent dans le système de villes par les activités économiques urbaines qu'ils induisent. Ainsi chaque cycle d'innovation est propagé dans le système de ville et s'accompagne de deux grands effets.

D'abord, l'acquisition d'une innovation par une ville se traduit par une restructuration de son activité économique. Par exemple, une ville peut s'adapter par création d'emplois pour accueillir et profiter de cette innovation. L'acquisition d'une innovation a donc un impact fort qui peut se traduire par des bénéfices et des profits, c'est-à-dire une croissance économique, par une croissance démographique ou encore par des indicateurs plus qualitatifs comme une diversification des ressources. L'innovation a donc pour effet de générer de nouvelles spécialisations et ainsi de diversifier les fonctions urbaines. Même si ces fonctions urbaines évoluent avec les innovations et les cycles économiques, il en reste des traces sur le très long terme : les analyses multivariées des activités urbaines ont montré que les grandes différenciations fonctionnelles entre les villes peuvent être décrites suivant les grands cycles du changement socio-économique (PUMAIN et SAINT-JULIEN, 1978 ; PAULUS, 2004). Les grandes révolutions industrielles sont toujours des *facteurs* bien visibles de différenciations des profils de fonctions urbaines, en fonction de l'intensité avec laquelle les villes ont accompagné les révolutions technologiques. La détermination et la mise en correspondance exacte de ces cycles économiques avec les grandes révolutions technologiques est encore soumise à débat mais on peut identifier cinq grands cycles d'innovation qui ont laissé des traces sur les profils économiques urbains (FREEMAN et LOUÇA, 2001) : le développement planétaire du commerce maritime et du secteur bancaire au XVII^e siècle et XVIII^e siècle, la première révolution industrielle (machine à vapeur et chemin de fer) au XIX^e siècle, l'électricité et l'automobile au tournant du XX^e siècle, la révolution électronique au milieu du XX^e siècle et finalement la vague NBIC (nano, bio, information et cognition) du début du XXI^e siècle.

Cependant lors de la propagation d'une innovation dans le système de villes, un deuxième effet joue sur l'impact relatif de l'acquisition sur la croissance urbaine. Cette effet diffère suivant la phase dans le cycle de diffusion durant laquelle l'acquisition se fait. Les travaux de PRED (1977) et BERRY (1991) mettent en relation les taux de croissance urbains avec les cycles d'innovation et leurs diffusions hiérarchiques dans le système de villes. L'impact positif sur la croissance est le plus fort quand l'acquisition s'est justement faite durant la phase d'émergence : l'acquisition précoce offre un avantage initial compétitif. Or les travaux de HÄGERSTRAND (1952) ont mis en évidence la diffusion hiérarchique des innovations : les plus grandes villes sont les premières à capturer les innovations, pour ensuite les propager suivant le canal descendant de la hiérarchie des villes. Elles sont les premières à bénéficier de l'exploitation d'une innovation et à profiter des plus grandes retombées positives.

Une théorie (PUMAIN, PAULUS, VACCHIANI-MARCUZZO et LOBO, 2006 ; PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009a) permet de résumer un cycle de développement socio-économique dû à la diffusion d'une innovation :

1. Pendant la phase émergente, un nouveau secteur économique se constitue dans les villes du haut de la hiérarchie qui ont acquis précocement l'innovation. L'innovation est une technologie de pointe qui nécessite une très haute qualification des emplois. Cette acquisition précoce et la diversification économique qui en résulte est à l'origine d'une croissance soutenue des plus grandes villes.
2. Durant la phase de diffusion, la technologie issue de l'innovation devient commune dans le système urbain. Le secteur économique associé se développe dans beaucoup de villes.
3. En phase de saturation, la technologie est mature et se banalise ou est peu à peu substituée. Le secteur économique correspondant est en difficulté par saturation des marchés, les emplois ne nécessitent plus de hautes qualifications. Mais les coûts de fonctionnement dans les grandes villes sont trop élevés pour maintenir ces activités qui sont peu à peu repoussées dans les plus petites villes.

Ainsi à chaque cycle, les activités associées à un nouveau cycle d'innovation se concentrent dans un premier temps dans le haut de la hiérarchie urbaine, puis diffusent dans le système urbain pour finalement se réduire, en désertant d'abord les grandes villes et en se concentrant dans quelques petites villes. Un schéma proposé par PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO (2009a) résume l'effet positif décroissant de l'acquisition d'une innovation sur une ville au cours de sa diffusion hiérarchique dans le système de villes (c.f. figure 1.6). Pour vérifier ce schéma théorique qui lie les cycles d'innovations économiques

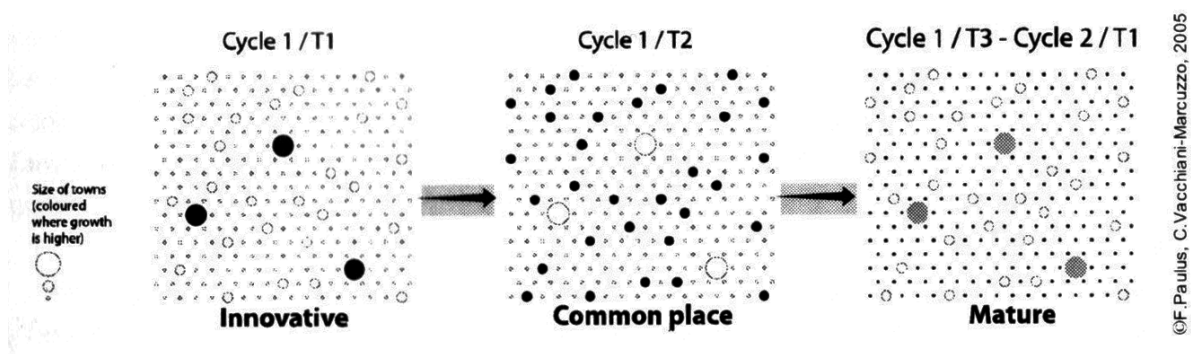


Figure 1.6 – Diffusion et substitution des cycles d'innovations dans le système de villes (PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009a, p.243)

au processus de diffusion hiérarchique de ces innovations, ils ont testé empiriquement l'effet d'échelle des tailles urbaines sur leurs activités économiques (PUMAIN, PAULUS,

VACCHIANI-MARCUZZO et LOBO, 2006 ; PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009a). Si les nomenclatures proposées par les organismes de recensement (INSEE par exemple) ne sont pas assez précises pour permettre une étude en profondeur, de grandes tendances peuvent être mises en évidence :

- Les activités et les emplois associés aux technologies de pointe (phase émergente du cycle) montrent des effets d'échelle supralinéaires : $\beta > 1$. Ces sont les activités liées à la R&D, aux services (consulting et assistance).
- Les activités et les emplois associés aux technologies plus communes (phase de diffusion du cycle) montrent des effets d'échelle linéaires : $\beta = 1$. Ce sont les activités liées au tourisme (développées à partir de la fin du XIX^e siècle grâce à l'avènement des transports plus rapides, elles sont maintenant largement répandues), les activités liées à la santé ou à l'éducation.
- Les activités et les emplois associés aux technologies matures (phase de saturation et déclin du cycle) montrent des effets d'échelle sublinéaires : $\beta < 1$. Ces sont les activités liées aux productions agro-alimentaires par exemple.

L'étude de l'évolution de ces indices β au cours du temps (pour la France entre 1962 et 1999) permet de valider ces grandes tendances. Alors que les activités liées aux technologies émergentes (Télécommunications, R&D, Consulting et assistance) présentent des exposants β qui croissent, les activités liées aux technologies émergentes ou communes en milieu de siècle mais désormais matures (industries de manufacture : papier, textile, métal, produits chimiques, etc.) présentent, elles, des exposants qui diminuent.

Cette théorie permet de lier les effets d'échelle observés dans le système urbain avec le processus spécifique de distribution de croissance associé à la diffusion hiérarchique. Ces effets concomitants peuvent ainsi être à l'origine du processus de hiérarchisation croissante dans le système de villes où augmentent les inégalités entre les tailles des villes. En effet une boucle de rétroaction positive favorise les villes du haut de la hiérarchie : elles sont les premières à capter l'innovation et sont aussi les premières à en profiter et donc à en bénéficier le plus. En conséquence elles développent une plus grande diversité d'activités économiques et atteignent de plus hauts degrés de complexité sociale et organisationnelle. La figure 1.7 montre nettement la corrélation entre la taille et la diversité économique des villes, c'est-à-dire la complexification urbaine qui augmente avec la taille des villes. L'innovation et son canal de diffusion dans le système de villes seraient donc à l'origine d'un processus moteur qui complexifie peu à peu la diversité fonctionnelle du système tout en amplifiant les écarts interurbains.

Cependant cette diversification économique, qui se traduit par une complexification des fonctions urbaines des grandes villes et par une hiérarchisation croissante, s'opère au sein

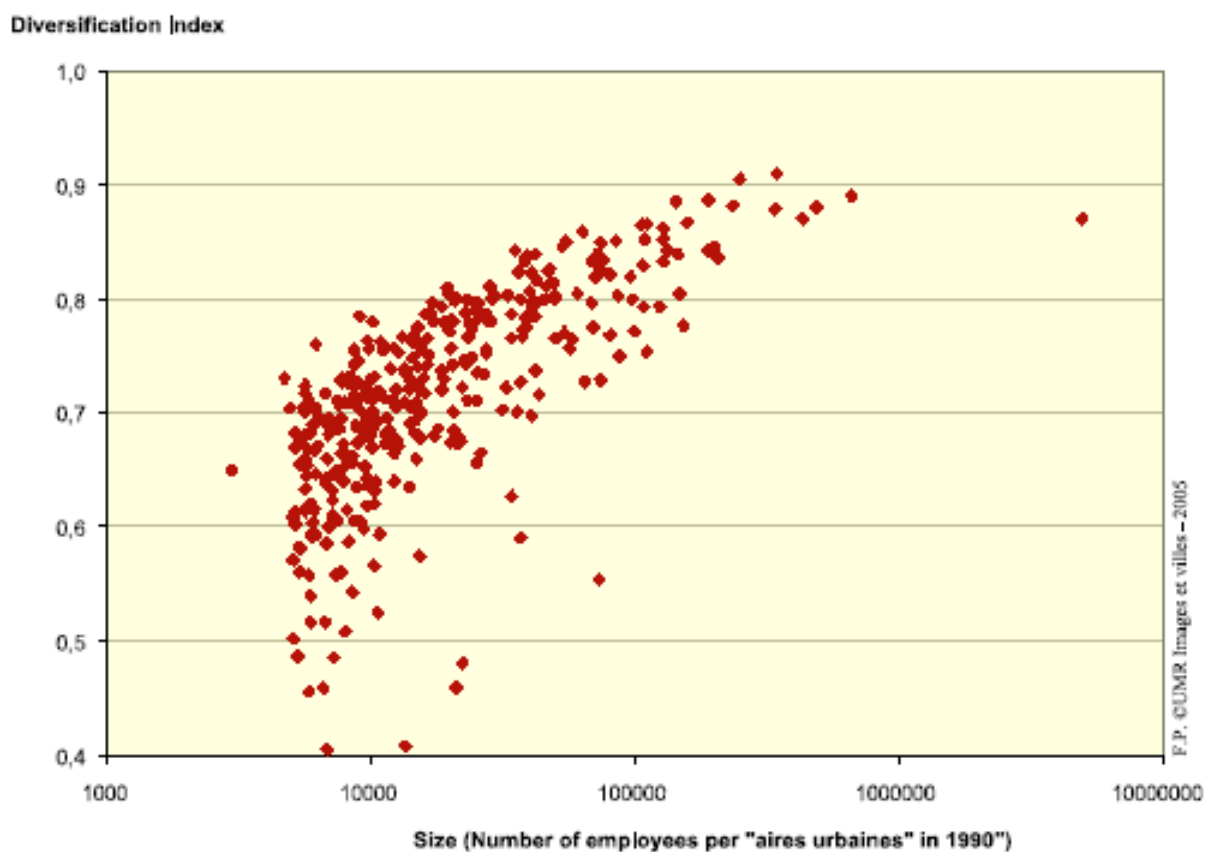


Figure 1.7 – Diversité économique et taille urbaine (PUMAIN, PAULUS, VACCHIANI-MARCUZZO et LOBO, 2006, p.8).

L'indicateur de diversité économique a été calculé à partir des nombres d'employés de 96 secteurs économiques en France (PAULUS, 2004). L'indicateur de diversité D est calculé à partir du coefficient d'Isard I ($D = 1 - I$) : plus il s'approche de 0 et plus les emplois d'une ville sont regroupés dans un unique secteur économique, et, au contraire, plus il est proche de 1 et plus la diversité économique de la ville est grande.

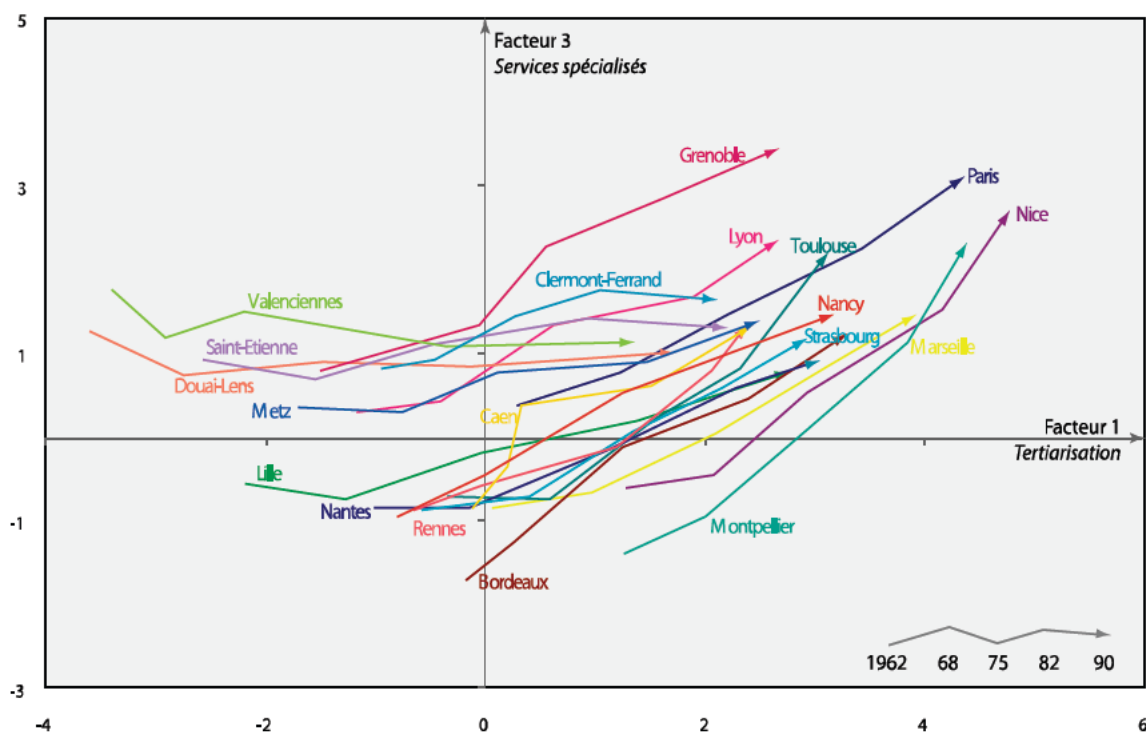
d'un système qui garde une remarquable cohérence dans sa dynamique globale. À partir de l'étude multivariée de l'évolution des profils d'activités économiques des aires urbaines françaises entre 1962 et 1990 (avec une nomenclature en 100 catégories d'emplois), PAULUS (2004) montre la coévolution des aires urbaines françaises par la similitude des trajectoires de leurs profils (c.f. figure 1.8). Cette trajectoire économique globale du système de villes tend à la disparition des spécialisations industrielles très marquées, vers une tertiarisation des activités et un développement des activités spécialisés dans la haute technologie. Le travail minutieux de mise en relation de ces trajectoires urbaines individuelles mené par F. Paulus dans sa thèse, lui permet de conclure sur une coordination active de l'évolution économique des villes qui s'auto-influencent au sein d'un même système :

"Au total, ces figures [...] permettent de mieux comprendre la stabilité de la structure économique du système. Toutes les villes, hormis quelques exceptions [...], concourent au mouvement d'ensemble de transformation du système productif. Chacune enregistre les changements et voit son profil économique se modifier dans les mêmes directions que celles observées en moyenne pour l'ensemble du système. Le parallélisme des trajectoires des figures [...] explique le relatif maintien des inégalités observées dès 1962. Aussi, la stabilité de la structure de différenciation économique du système des villes n'est pas le résultat d'une inertie des profils économiques de chaque ville. Au contraire, la rapidité de la diffusion des innovations économiques dans le système des villes contribue au maintien des différences acquises antérieurement et en cela signifie le processus de coévolution des villes."

(PAULUS, 2004, p.285)

1.3.3 La taille démographique d'une ville comme marqueur de sa complexité

En outre les travaux sur les caractéristiques socio-économiques des villes et les lois d'échelle associées montrent que la taille démographique de chaque ville est une bonne approximation de sa complexité urbaine : il existe une relation mathématique entre les deux. La taille de la population d'une ville peut ainsi être utilisée comme un bon indicateur ou *proxi* de sa complexité. "*C'est en effet une variable très synthétique, corrélée à de très nombreuses variables du système urbain et qui possède une signification comparable dans le temps*" (GUÉRIN-PACE, 1993, p.284). Cependant cette observation soulève le problème de la quantification de la population de chaque ville qui dépend intrinsèquement de la définition que l'on choisit pour sa délimitation. C'est là tout l'enjeu de l'élaboration de bases de données harmonisées et cohérentes (BRETAGNOLLE, GUÉROIS et al., 2011).



Source : INSEE – Recensements de la population – SAPHIR

Figure 1.8 – Trajectoires des grandes aires urbaines françaises en fonction de leur spécialisation économique (1962-1990) (PAULUS, 2004, p.287)

Ce plan factoriel est issu d'une analyse en composantes principales où sont représentées les trajectoires économiques des plus grandes aires urbaines françaises. Le premier facteur regroupe les activités correspondant aux services (tertiarisation), tandis que le facteur 3 correspond aux activités plus techniques et à celles liées à l'économie du savoir et des loisirs.

1.3.4 Auto-catalyse de l'innovation et de l'urbanisation

Les relations supralinéaires entre taille des villes et secteurs économiques en lien avec la création, au développement et à l'innovation montrent le rôle que jouent les grandes villes dans l'émergence et le développement d'innovations. Ce rôle crucial est connu depuis très longtemps dans beaucoup de domaines : intellectuel et matériel, culturel et politique, institutionnel ou organisationnel (BAIROCH, 1985 ; BRAUDEL, 1967 ; HALL, 1998). Le rôle des villes comme élément centralisateur du capital humain et incubateur de l'invention a été redécouvert par les nouvelles théories de la croissance économique (GLAESER, 1994). À la suite de SCHUMPETER (1939) puis ROMER (1986), le capital humain, le capital intellectuel mais surtout les retombées que ces capitaux génèrent sont intégrés dans les théories et modèles comme éléments essentiels de la croissance. GLAESER (1994) résume très bien la trajectoire épistémologique en économie du rôle des villes dans la production des nouvelles idées, éléments moteurs de la croissance. Ce rôle est d'autant plus fort que l'innovation au sein des villes suit un processus de rétroaction positive : la création et le développement des savoirs dans les centres urbains renforcent leur attractivité sur les individus hautement qualifiés et créatifs qui en se relocalisant dans ces centres contribuent à la génération de nouvelles retombées de la concentration des savoirs (FELDMAN et FLORIDA, 1994). Ce processus est théorisé par ARTHUR (2009) comme un processus évolutif qui s'autogénère par recombinaison et mutation des innovations : plus le *pool* d'innovations, de savoir, de techniques dans lequel puiser est grand, plus les possibilités de recombinaison et de mutations sont grandes. L'apparition progressive d'une explosion combinatoire a généré une *explosion* des innovations dont le rythme d'apparition n'a cessé de s'accélérer (ARTHUR, 2009 ; LEEUW, LANE et READ, 2009).

Parce qu'elle concentre les idées et les personnes, qu'elle *maximise l'interaction sociale* (CLAVAL, 1982), la ville est le catalyseur de la rétroaction positive de l'innovation sur l'innovation. En contre-partie l'innovation joue un rôle moteur sur la croissance et la complexification urbaine. Il existe donc un processus d'auto-catalyse entre l'innovation et l'urbanisation. Il paraît donc essentiel de mettre en relation l'*explosion des innovations* avec l'*explosion urbaine* (LANE et al., 2009, p.3) depuis l'émergence des villes jusqu'à la transition urbaine et l'apparition de *megacities*.

1.3.5 Innovations dans les transports : Les effets de la contraction de l'espace-temps sur le système de villes

"Depuis l'invention de la roue, à l'époque néolithique, jusqu'à l'invention de l'avion à réaction, à l'époque actuelle, la vitesse de déplacement des hommes entre les villes est passée de 5 km/h à 1000 km/h."

(BRETAGNOLLE, 1999, p.4)

Ce mouvement d'accroissement des vitesses de communication a présenté des phases d'accélération massive grâce à l'apparition d'innovations majeures telles que la construction de réseaux de routes au début du XIX^e siècle, de réseaux de chemins de fer à partir de la moitié du XIX^e siècle, et enfin d'autoroutes et d'aéroports au milieu du XX^e siècle. Ces fabuleux gains de vitesse changent les conditions des échanges entre les lieux en simulant une véritable *convergence* ou *contraction de l'espace-temps* (JANELLE, 1968) par un rapprochement relatif et un allongement des portées (c'est-à-dire des distances parcourues pour les échanges). Il faut y ajouter une réduction considérable du coût des transports, terrestres notamment, évaluée selon un rapport de 10 à 1 entre 1800 et 1900 (BAIROCH, 1985). L'impact de la vitesse des échanges et de son évolution sur l'organisation du territoire est un sujet complexe qui a passionné les géographes depuis près de 150 ans (BRETAGNOLLE, 1999 ; BRETAGNOLLE et ROBIC, 2005).

Plusieurs théories établissent dès le début du XX^e siècle un lien entre l'accroissement des vitesses et l'augmentation des inégalités entre les tailles de villes. Ainsi les théories de H. Mackinder et de P. Vidal de la Blache (citées par BRETAGNOLLE (1999) ; BRETAGNOLLE et ROBIC (2005)) décrivent un double effet de la contraction de l'espace. D'un côté, la réduction du nombre d'étapes dans les échanges entraîne un court-circuitage des plus petites villes et une simplification par le bas de la hiérarchie. De l'autre, la capacité des grandes villes à capter les innovations dans les technologies des transports leur permet d'augmenter leur portée et d'établir des échanges avec un plus grand nombre de marchés, favorisant leurs activités donc leur croissance et entraînant ainsi une hiérarchisation par le haut. Ces deux effets sont deux processus de sélection géographique, l'un par le bas de la hiérarchie urbaine (court-circuitage des plus petites villes) et l'autre par le haut (sélection et avantage donné aux plus grandes villes). Plus tard la théorie des lieux centraux formalisera géométriquement l'influence des coûts (monétaires et temporels) de transports sur la répartition spatiale des tailles de centres. W. Christaller s'appuie d'ailleurs sur les différences d'espacement moyen interurbain mesurés dans plusieurs systèmes de villes pour argumenter sa théorie des lieux centraux (cité par BRETAGNOLLE (1999, p.42)). La structure spatiale du système urbain des pays neufs s'est formée à des époques où les moyens de communication étaient plus rapides que ceux disponibles lors de la structuration spatiale des systèmes urbains des pays anciennement urbanisés. L'espacement moyen entre deux villes de plus de 10 000 habitants en Europe est d'environ 13 km, il est de 17 km en Inde, mais il dépasse 60 km en Amérique du Nord (MORICONI-EBRARD, 1993). Ainsi les pays nouvellement urbanisés ont des villes en moyenne bien plus espacées que les pays anciennement urbanisés. Les espacements entre les villes seraient ainsi régis par le rythme des échanges entre les villes lors de la mise en place de ces systèmes. Cependant l'impact de l'évolution de ces rythmes d'échange sur l'organisation de ces territoires n'est envisagé dans la théorie des lieux centraux qu'en terme de diminution de coûts de transport. Cette diminution des coûts profite aux plus grands lieux centraux en augmentant

leur aire d'influence. Après les travaux de W. Christaller, de nouveaux travaux ont pu être développés grâce à de nouvelles techniques de traitement informatique et l'élaboration de vastes bases de données numérisées. Ces travaux ont cherché à quantifier l'effet de l'évolution de l'espace-temps sur l'organisation du système de peuplement. Dans ces travaux la notion d'accessibilité, alors comptabilisée en distance-temps, sert de témoin de l'évolution des vitesses et du changement des distances relatives entre les villes. Dans la théorie de JANELLE (1969) l'évolution de l'accessibilité est mise en perspective avec une réorganisation spatiale des systèmes urbains par centralisation et spécialisation des lieux. Les travaux de E. Juillard (cité par BRETAGNOLLE et ROBIC (2005)) et de PUMAIN (1982) ; BRETAGNOLLE (1999) ; BRETAGNOLLE (2003) font le rapprochement entre évolution de l'accessibilité locale et croissance urbaine. Ils cherchaient à montrer à la fois le déclin relatif de villes court-circuitées par le développement de nouveaux réseaux de transport et la croissance relative des villes précocement reliées aux réseaux de transport innovants. Cependant ces processus sont tellement complexes, à la fois dans leurs dimensions spatiales (une nouvelle connexion Lyon-Paris, va-t-elle profiter autant aux deux villes ?) et temporelles (au bout de combien de temps une modification dans l'accessibilité d'une ville peut-elle avoir un effet visible sur son économie ?), qu'une démonstration formelle de l'effet structurant des réseaux au niveau local est très difficile à donner. Nous développerons cette question dans le cinquième chapitre de cette thèse. Pourtant les résultats donnés dans les travaux cités vont très largement dans le sens d'une démonstration des effets structurants des réseaux sur le système de villes. Ils mettraient en avant un processus de coévolution, une boucle de rétroaction positive entre position relative des villes et croissance urbaine.

Ainsi la contraction de l'espace-temps, en simulant un rapprochement relatif des villes et un accroissement des aires d'influence des villes, contribue au processus de hiérarchisation du système de peuplement, à la fois par le bas de la hiérarchie (par court-circuitage des petites villes-étapes), et par le haut (par la captation précoce des innovations dans les transports qui favorise les activités économiques des grandes villes).

1.4 Le processus d'urbanisation

1.4.1 Une urbanisation croissante marquée par deux grandes inflexions

Le fait urbain est apparu de façon indépendante à plusieurs endroits de la surface de la terre. Bien que son apparition remonte à plusieurs milliers d'années, ce n'est pourtant que depuis environ deux siècles qu'il a pris une ampleur telle qu'il devient le mode d'habitat dominant. C'est déjà le cas depuis plus d'une cinquantaine d'années pour les pays ayant connu un développement industriel ancien, mais c'est désormais le cas de la population mondiale, depuis la première décennie du XXI^e siècle : plus de la moitié de la population totale du monde réside désormais dans les villes. L'urbanisation de la population est plus ou moins avancée selon les régions du monde : l'Europe, l'Amérique du Nord, mais aussi l'Amérique Latine, sont fortement urbanisées (70 à 80% de la population y vit en ville). L'Afrique et l'Asie comptent encore une majorité de ruraux, mais toutes les prédictions (ONU, Banque Mondiale, etc.) indiquent que les urbains devraient bientôt devenir majoritaires, comme partout ailleurs dans le monde. Ces continents, sur lesquels la population croît le plus vite, abriteront d'ailleurs demain la majorité des mégapoles et des mégalo-poles mondiales.

Si l'on suit l'histoire de l'urbanisation de l'humanité, on entrevoit deux grandes inflexions dans le processus d'urbanisation. La première, évidente, est l'apparition du mode de vie urbain. Ce processus historique, daté de la fin du IV^e millénaire avant notre ère pour les premières villes du Moyen-Orient (Mésopotamie) a reçu une multitude d'interprétations quant à son principal facteur déclenchant (CHILDE, 1950 ; HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990 ; BUTTERLIN, 2003 ; MARCUS et SABLOFF, 2008). Certains ont avancé l'importance du mythe et du sacré pour l'établissement de formes de sociétés organisées par un pouvoir centralisé et de dimension plus grande que celles jamais atteintes par les groupes de chasseurs-cueilleurs ou les agriculteurs sédentaires (RACINE, 1993 ; DESMARAIS, 1998). D'autres ont mis en avant les liens entre le développement des villes et l'organisation politique de territoires à contrôler. À cet égard, l'hypothèse de l'"État hydraulique" popularisé par K.A. Wittfogel est souvent citée : *"Les édifices archaïques d'Uruk² furent considérés comme des temples, centre du pouvoir qui gérait les ressources des communautés urukéennes. L'État hydraulique était le fruit de la nécessaire coopération des populations pour l'entretien du réseau d'irrigation et les rois-prêtres assuraient la cohésion de l'ensemble social ainsi constitué"* (BUTTERLIN, 2003, p.87). Une troisième série d'arguments propose le changement de l'activité économique comme explication de l'ur-

2. La société d'Uruk est souvent prise comme exemple pour illustrer les premières formes d'urbanisation. Le terme d'Uruk désigne à la fois la société et un des points de peuplement les plus importants de cette société, en basse Mésopotamie.

banisation : l'émergence indépendante des villes, en plusieurs régions du monde, quelques milliers d'années après l'apparition de l'agriculture, aurait été rendue possible par la production de surplus agricoles et l'accumulation de réserves alimentaires pouvant soutenir une population urbaine et dirigeante, déchargée de la nécessité de produire sa subsistance (CHILDE, 1950 ; BAIROCH, 1985 ; DIAMOND, 1997). Ces théories ne sont pas contradictoires dans la mesure où chacun des aspects mentionnés participe nécessairement, à des degrés divers selon les sociétés observées, au fonctionnement et à l'évolution de la vie en ville. Selon les sociétés et les terrains étudiés par les archéologues, l'un ou l'autre de ces développements sociaux (religieux, politique ou économique) a pu précéder les autres. Les processus d'émergence des premières formes d'urbanisation sont toujours très difficiles à mettre en évidence car ils s'inscrivent dans une continuité d'évolution qui implique néanmoins une diversité de processus. J.-L. Huot décrit cette difficulté en s'appuyant sur l'exemple de l'émergence des premières cités en basse Mésopotamie :

"[...] on voit encore mal selon quelles modalités précises on est passé, en quelques siècles, d'une société agricole très spécialisée et bien adaptée à cet environnement si particulier qu'on appelle la société obéidienne [...] à une société beaucoup plus complexe telle qu'on peut l'entrevoir à Uruk et sur les sites souvent fort éloignés qui sont en liaison avec cette ville. On est loin des certitudes de Childe et du tableau bien agencé qu'il brossait il y a une cinquantaine d'année ; mais que mettre à la place ? A vrai dire, beaucoup d'éléments ont dû intervenir : la difficulté de l'environnement, le changement d'échelle [...], la force d'expansion d'une société céréalière favorable au développement d'une stratification sociale qui peut déboucher sur l'existence de classes et la naissance progressive d'une société étatique, les nécessités d'une gestion plus complexe des biens, ou encore l'obligation de structurer de manière plus forte une société dont la population s'accroît (mais s'accroît-elle ?). Les questions sont innombrables, mais trop souvent, dans les études actuelles, de belles théories s'élaborent fort loin du terrain - qui ne livre, à vrai dire, que d'assez rares données. Parfois, une série de déductions impressionnantes ne repose que sur une pointe extrêmement fragile. [...] Dans certains [...] domaines, qui sont cruciaux (la naissance de l'État, la stratification sociale, la spécialisation à plein temps des artisans par exemple), il est vrai qu'à la fin du IV^{ème} millénaire des changements importants, pour ne pas dire des transformations radicales, se sont produits, et que la recherche archéologique a pu les mettre en évidence. Quelles que soient les causes profondes de ces phénomènes, les faits sont là : on peut parler de l'émergence de véritables agglomérations urbaines"

(HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990, p.28-30)

L'émergence des villes s'est produite, de façon indépendante, en plusieurs endroits du

monde (Égypte, vallée de l'Indus, Chine du sud, Amérique centrale, Afrique subsaharienne), à des moments échelonnés dans l'histoire. Pourtant l'émergence des villes s'est toujours produite dans des régions où une agriculture sédentaire était apparue, sans doute elle-même associée à la technique du stockage des denrées alimentaires, quelque 2000 à 3000 ans auparavant (BAIROCH, 1985). Les latitudes subtropicales, mais aussi l'inégale richesse des dotations régionales en espèces animales domesticables et végétales cultivables ont été mises en avant pour expliquer la localisation des zones converties à l'agriculture (DIAMOND, 1997). Mais quelles que soient les origines de l'agriculture, l'émergence des villes s'est aussi produite dans toutes les régions où l'agriculture avait été inventée (à l'exception de quelques territoires insulaires de dimension réduite). Cette similitude des évolutions est un argument important pour confirmer l'hypothèse d'un lien nécessaire entre la mise à disposition d'un surplus agricole, les formes d'organisation sociale associées et l'émergence des villes. Une fois établie, l'urbanisation est ensuite restée pendant très longtemps à un niveau d'expansion modeste. Les villes ont abrité moins de 20% des populations totales pendant des siècles voire des millénaires :

"Davies et Hertz estimaient en 1957 que, dans le monde vers 1800 après J.-C., 3% de la population totale résidait dans des villes. C'était encore un monde pré-industriel, plus proche de l'époque romaine que du monde contemporain. Bairoch, en 1985, considère que ces estimations sont beaucoup trop faibles et qu'un taux de 8 à 10% est plus proche de la réalité. Il n'exclut pas que le monde, aux environs de la fin du *I^{er}* siècle après J.-C., ait connu déjà un taux de population urbaine de 7% à 10%. Selon lui pour des raisons de contraintes incompressibles (alimentation en eau et en nourriture, capacité de transport), le taux d'urbanisation, dans le cadre des grandes sociétés traditionnelles non-industrialisées, ne peut dépasser 10 à 15% de la population totale. C'est pourquoi, d'après lui, le taux d'urbanisation maximal a vite été atteint, en un ou deux millénaires".

(HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990, p.10)

Cependant, intervient à partir du début du XIX^e siècle un changement radical dans la progression de l'urbanisation. Le taux d'urbanisation, défini par la proportion de la population totale résidente en ville, passe de 10 à 80% dans la plupart des pays industrialisés, en un siècle et demi environ, et depuis 1950 cette évolution se produit encore plus rapidement dans l'ensemble des pays en développement. La figure 1.9 retrace sous forme de graphe l'évolution depuis 1300 de la population totale et urbaine des pays d'Europe et d'Amérique du Nord. Jusqu'au XIX^e siècle, ces pays ont connu un taux d'urbanisation relativement stable malgré l'augmentation progressive et continue de la population. Ce taux a pu varier d'une époque à l'autre, d'une région à l'autre, mais s'est situé en moyenne aux alentours de 10% (BAIROCH, 1985 ; DE VRIES, 1984), n'atteignant qu'exceptionnellement

les 30% (par exemple dans les Pays-Bas ou l'Italie du XVII^e siècle (BAIROCH, 1985)). Puis une période de transition majeure inverse complètement les rapports villes-campagnes : si l'activité agricole demeure dominante en termes de superficie d'occupation du sol, la population, son habitat, ses activités et ses modes de vie sont devenus très largement urbains. Le passage d'une population majoritairement rurale, rassemblée autour de petites unités d'habitat, peu hiérarchisées et dispersées sur tout le territoire à une population majoritairement urbaine concentrée dans des villes de beaucoup plus grandes taille a été identifié comme la transition urbaine (ZELINSKY, 1971), par analogie avec le processus de transition démographique. La transition urbaine est le signe d'un nouveau changement de fond dans l'organisation des activités économiques, des modes de vie et des structures sociales, mais aussi un bouleversement des structures spatiales du peuplement. L'évolution du taux d'urbanisation dans les pays du monde montre une très grande diversité des temporalités et des rythmes de la transition urbaine, bien que le processus soit largement engagé dans tous les pays. Le contraste entre la transition urbaine des pays anciennement industrialisés et celle des pays du Sud, est aussi lié à la diversité de ses composantes, l'exode rural ayant joué un très grand rôle dans le premier cas et la croissance démographique un rôle plus important dans le second (PUMAIN, 2003).

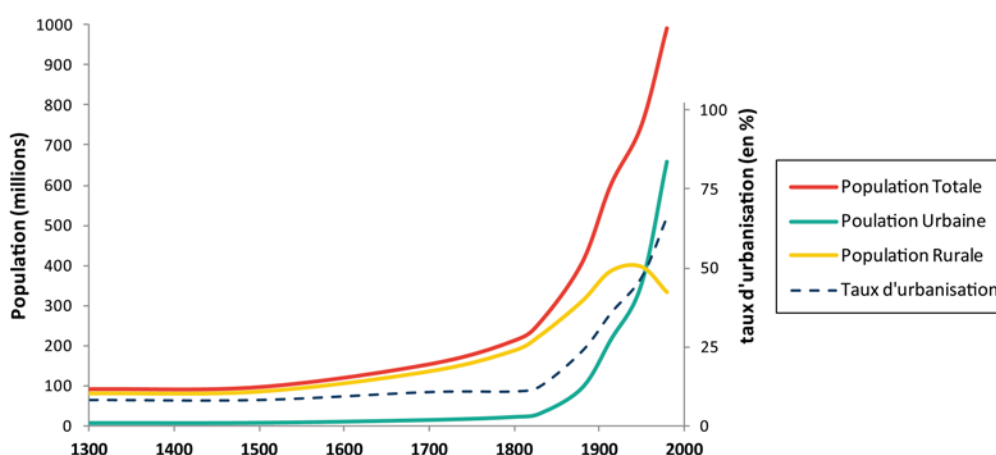


Figure 1.9 – Évolution de la population urbaine et du taux d'urbanisation des pays anciennement industrialisés (1300-1990)(BAIROCH et GOERTZ, 1986, p.286)

Pays pris en compte : Autriche-Hongrie, Belgique, Bulgarie, Danemark, Finlande, France, Allemagne, Grèce, Italie, Pays-bas, Norvège, Portugal, Roumanie, Russie, Serbie, Espagne, Suède, Suisse, Grande-Bretagne, Canada, États-Unis.

Au XIX^e siècle, la croissance des villes est alimentée principalement par l'exode des zones rurales, où l'augmentation de la productivité agricole chasse le trop plein de main-d'œuvre des campagnes. Simultanément, la transition démographique avec la forte croissance de population qu'elle engendre entretient la poussée urbaine. Le processus d'urbanisation suit la diffusion de la Révolution industrielle, plus précoce dans les pays de

l'Europe du nord-ouest, assez rapide aux États-Unis et dans les pays neufs, et un peu plus tardive dans certains pays de l'Europe méditerranéenne (PUMAIN, 2003), qui étaient pourtant les plus urbanisés au début du processus (MORICONI-EBRARD, 1993). Tous ces pays ont connu une accélération de l'urbanisation après la Seconde Guerre mondiale, poussée par la forte croissance économique, le baby boom et une migration des campagnes vers les villes toujours très forte. Les autres pays du monde (essentiellement des pays en développement) n'avaient dans l'ensemble pas encore amorcé leur transition urbaine en 1950. L'explosion de la croissance de la population urbaine qui se déclenche alors est sans commune mesure dans son intensité avec celle des pays industriels. Au lieu de s'étaler sur près de deux siècles, il semblerait que la transition urbaine des pays du Sud s'effectuera en un peu plus d'un demi-siècle seulement. Cette croissance urbaine sans précédent, nommée *explosion urbaine*, n'a pas non plus les mêmes composantes que la transition urbaine des pays anciennement urbanisés. La très forte croissance démographique s'explique par une réduction de la mortalité. Cette réduction de la mortalité est plus accentuée dans les villes que dans les campagnes, ce qui explique une concentration de la population urbaine dans les très grandes villes des pays du Tiers-Monde. Ces concentrations sont bien supérieures à celles observées pour le même taux d'urbanisation dans les pays développés et provoquent de forts dysfonctionnements sociaux (inégalités sociales sans précédent, propagation des bidonvilles, etc. (DAVIS, 2007)). Il n'est pas étonnant que la répartition mondiale des plus grandes villes ait complètement basculé : alors qu'en 1900, sur les quelques villes millionnaires, une seule était localisée dans un pays du Sud, on en dénombrait un tiers en 1950, plus de la moitié dès 1990 (MORICONI-EBRARD, 1993) et les deux tiers aujourd'hui (ONU).

Par ses effets radicaux en termes de concentration du peuplement et d'amplification de la taille des villes, cette transition urbaine des deux derniers siècles apparaît bien comme une seconde inflexion majeure dans l'histoire des villes (c.f. figure 1.10). On peut cependant discuter la nature de l'émergence qu'elle représente. En effet, il semble que dans l'abstraction de ses fonctionnalités, la forme de peuplement en "villes" n'ait pas fondamentalement changé de nature depuis son émergence initiale. Cet argument peut être attesté par la continuité de la dénomination utilisée (ville, urbain, etc.). À l'échelle de l'évolution de l'humanité et des sociétés sur le temps long, il s'agit toujours d'une forme d'habitat qui permet la survie, le développement et l'accumulation à partir de la mise en réseau de ressources situées dans des lieux plus ou moins éloignés. Cette forme d'habitat s'oppose aux villages (ou aux extractions minières) qui vivent principalement des ressources de leur site, c'est-à-dire de leur environnement immédiat. De l'exploitation de ces ressources de site par les sociétés rurales, les sociétés urbaines sont passées à l'exploitation de richesses de situation (REYMOND, 1981 ; PUMAIN et MORICONI-EBRARD, 1997). Les ressources importées d'ailleurs permettent de pallier aux manques permanents ou momentanés des lieux. Surtout, les villes sont le lieu de la multiplication de l'innovation (sous toutes ses

formes : technique, économique, politique, culturelle, etc.) à partir d'échanges locaux mais aussi à plus longue distance, induisant du même coup une division du travail accrue et une considérable expansion de la complexité sociale. En ce sens, la nature profonde du fait urbain est bien demeurée la même depuis son invention depuis plusieurs millénaires, et on serait en droit de considérer que l'émergence des villes après le Néolithique est la transition fondatrice dont les effets se poursuivent encore aujourd'hui. Toutefois, les modalités de la dynamique des villes qui rendent compte de l'accélération de cette évolution au moment de la révolution industrielle incitent bien à identifier et à modéliser différemment une seconde transition. Cette seconde transition qui conduit à l'émergence des niveaux actuels de l'urbanisation est expliquée par les conséquences de la facilitation des échanges entre les villes, notamment en termes de réduction des coûts de transport. Nous allons spécifier les principaux traits de ces deux régimes de dynamique urbaine qui seront retenus en vue de leur modélisation.

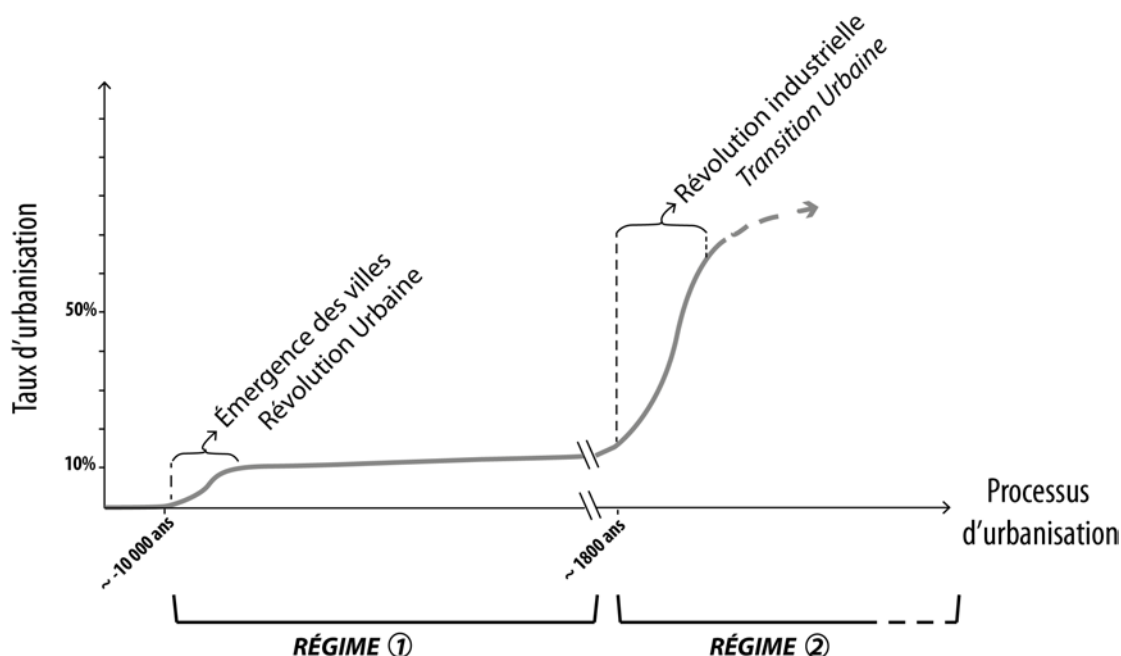


Figure 1.10 – Deux régimes de dynamique de concentration de la population dans les villes des pays anciennement industrialisés

1.4.2 Deux régimes de dynamiques urbaines

Deux types de dynamiques urbaines peuvent être schématisés à partir des connaissances acquises sur l'histoire de l'urbanisation, en vue de modéliser les deux périodes de transition évoquées précédemment. Les deux types de dynamique correspondent à la formation d'un système de villes qui se hiérarchise progressivement. Cependant ce qui les distingue du point de vue géographique relève d'abord des rythmes quantitativement

très différents de développement des villes et des différences d'emprise physique sur le territoire. En simplifiant beaucoup, on peut faire l'hypothèse que dans les deux cas c'est bien l'accessibilité aux ressources qui joue comme une contrainte sur la croissance des centres de peuplement. Mais dans le premier cas cette contrainte de l'accessibilité aux ressources procède avant tout de l'incertitude sur le niveau local des ressources : les coûts et la pénibilité des échanges à longue distance limite le niveau de croissance à ce qui peut localement être accessible donc exploitable. C'est pourquoi nous appellerons notre premier modèle *SimpopLocal*. Dans le second cas la limitation des échanges à longue distance est considérablement relâchée avec la diminution des coûts, et la contrainte de l'accessibilité change. Ce qui différencie les croissances des centres de peuplement est la situation des villes les unes par rapport aux autres, au sein d'un système de villes en interaction. Les villes aux meilleures accessibilités globales dans le système ont des échanges facilités. Or les échanges et les interactions sont à l'origine des dynamiques d'innovation et les innovations sont le moteur de la croissance urbaine. La situation relative des villes dans le système de villes, résumé par son accessibilité au sein du système, joue comme une contrainte sur la croissance urbaine. Ce deuxième modèle sera donc appelé *SimpopNet*.

Ainsi, à partir de cette hypothèse de l'accessibilité aux ressources comme facteur limitant à la croissance, nous supposons que l'évolution de l'accessibilité aux ressources peut être à l'origine des changements dans les dynamiques d'urbanisation et donc dans l'organisation sociale et spatiale des peuplements :

"Improvement of accessibility to more and more sophisticated activities, in order to reduce life uncertainties (ecological and social), could be considered as the main constraint operating on the evolution of the system."

(PUMAIN, 2004c, p.19)

1.4.2.1 Un régime de dynamique des centres de peuplement à croissance fortement contrainte par les conditions locales

La contrainte locale joue très fortement, voire violemment, sur le destin des premières villes. À l'époque des premières villes, la dynamique du système de villes émergent est très lente, faite aussi bien de l'émergence de marchés locaux (dynamique endogène au territoire considéré) que de l'apparition, plus rare, de nœuds dans des réseaux de circulation à plus longue distance. Elle est aussi caractérisée par la très grande vulnérabilité de ces deux types de centres (marchés locaux et nœuds dans des réseaux de circulation) aux aléas des milieux naturels (irrégularités ou catastrophes climatiques, événements sismiques, etc.) comme à ceux de la politique (invasions, destructions, pillages, provoquant des disparitions complètes de villes, voire de civilisations urbaines entières). Les villes restent très vulnérables à une diminution de ressources dans leur sphère d'influence locale

(mauvaises récoltes successives), à des catastrophes naturelles (séismes, inondations) et plus souvent encore aux attaques, pillages et destructions dont elles se protègent souvent par des fortifications. Les archéologues et les historiens signalent par exemple des disparitions de nombreuses villes jusque après l'Antiquité en Europe occidentale, des destructions quasi totales en Asie centrale jusque vers le XIII^e siècle à la faveur des grandes conquêtes d'empire comme celles de Gengis Khan ou de Tamerlan, tandis que des villes amérindiennes étaient parfois détruites encore au XVI^e siècle par les Espagnols. J.-L. Huot précise la vulnérabilité des premières cités :

"Le phénomène urbain est réversible. Ce qui est étonnant, ce n'est pas le fait, banal en soi et de tous les temps, qu'une ville cesse d'exister. On constate plutôt des cas de désurbanisation générale à l'échelle de la région. Cela veut dire que l'urbanisation d'un pays n'est jamais définitivement acquise. Non seulement ces cités, grandes ou petites, sont des organismes fragiles, car le mode de vie urbain est artificiel et vulnérable, mais surtout les villes fonctionnent les unes par rapport aux autres en un réseau qui ne vit que par là même. Or, ce sont des réseaux entiers de cités qu'on voit parfois disparaître en Orient."
(HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990, p.326)

Même en l'absence de guerres ou de prédatons, ces villes n'ont pas une très grande résilience, car même si elles communiquent et commercent avec d'autres centres, leur rayon d'action reste limité. Pendant des millénaires la *tyrannie de la distance* (BAIROCH, 1985) limite les transports des ressources et des biens et donc la possibilité des échanges. Cette notion est intimement liée à celles des temps et des coûts de transport. Les temps de transport jouent sur les distances maximales de possibilité d'échange de biens périssables par exemple. Les coûts de transport sont bien illustrés par l'exemple donné par BAIROCH (1985, p.33) sur le transport à dos d'homme : "*on peut estimer qu'un homme est capable de transporter par jour 35-40 kilos sur 30-35 kilomètres. Or, pour sa seule nourriture, il doit consommer environ 1 kilo du chargement par jour ; soit, en tenant compte du retour, 1 kilo par 17 kilomètres. Ce qui implique - en simplifiant à l'extrême - que dès 300 kilomètres, la moitié du chargement est absorbée par les frais de transport ; et que dès 600 kilomètres, c'est la totalité du chargement qui est absorbée par les frais mêmes de transport*". Sa démonstration ne s'arrête pas à la seule considération des transports à dos d'homme mais montre que les coûts de transport des céréales par attelage doublent dès les 260 kilomètres. "[E]n définitive on retrouve une forte contrainte : un coût élevé de transport" (BAIROCH, 1985, p.33), qui conditionne les possibilités d'importation des ressources et limite la croissance démographique des points de peuplement.

D'un autre côté, l'éventail des connaissances, des techniques, mais aussi des structures sociales à disposition limitent tout autant l'accession aux ressources potentiellement dis-

ponibles. On trouve aisément une illustration de cet effet avec l'exemple de l'évolution des techniques de stockage :

"En effet le niveau de population pour des gens qui ne font pas de provisions est déterminé par le niveau de ressources pendant la saison de plus grande pénurie, car si même un territoire donné pouvait nourrir une population, disons, de mille personnes pendant les périodes d'abondance, si, dans la pire période de pénurie ce territoire peut n'en nourrir que cent, alors il faut que neuf cents meurent ou émigrent, et le niveau de population doit se stabiliser à cent. La constitution de réserves, en permettant de transférer une partie des ressources des périodes d'abondance à celles de pénurie, en permettant de transférer une partie des ressources des périodes d'abondance à celles de pénurie, permet, dans l'exemple précédent, si les réserves peuvent nourrir cent personnes pendant tout le temps de la pénurie, une stabilisation du niveau de population à deux cents personnes."

(TESTART, 2012, p.208)

De la même façon le niveau de technique, de connaissance mais aussi la forme d'organisation sociale peuvent être des facteurs limitant la taille démographique des points de peuplements. Les échanges restent cependant le moteur de la structuration et de l'expansion de l'urbanisation. Les exemples souvent cités comme ceux d'Athènes et surtout de Rome qui organisent à leur profit le commerce de la Méditerranée sont d'une ampleur exceptionnelle, mais n'étaient probablement pas durables à ce niveau avec les moyens de l'époque. Aussi, le rôle des échanges de cette structuration de l'urbanisation n'était peut-être pas tant l'importation des biens et des denrées mais la diffusion des savoirs :

"Si l'on a sans aucun doute tendance à surestimer sur le plan économique l'ampleur des flux d'échange, ceux-ci sont néanmoins suffisant pour jouer un rôle dans le transfert d'innovations [...]. Pour bien mesurer l'ampleur limitée que peuvent avoir des échanges dans des sociétés traditionnelles et, *a fortiori*, dans les sociétés pré-historiques, signalons que pour l'Europe, continent sans doute le plus extraverti, et pour la fin du XVII^e siècle, moment qui constitue le sommet historique avant la révolution industrielle, les exportations (ou les importations) ne représentaient pas plus de 2-3% (et probablement moins) du volume de production."

(BAIROCH, 1985, p.43)

La population urbaine sous ce régime reste minoritaire (en moyenne 10 à 20%) et les très grandes villes ne maintiennent jamais longtemps des populations de plus de 1 million d'habitants. Selon les experts, la population caractéristique d'une "grande ville" jusqu'à

l'Antiquité serait plutôt de l'ordre de quelques milliers d'habitants (CHILDE, 1950 ; BAIROCH, 1985 ; HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990 ; BUTTERLIN, 2003 ; MARCUS et SABLOFF, 2008), et le taux moyen d'accroissement de leur population de l'ordre de 0,1% par an, ce qui expliquerait pourquoi il a sans doute fallu quelques milliers d'années à ces premiers systèmes urbains pour se hiérarchiser.

1.4.2.2 Un régime de dynamique à croissance rapide et libérée des contraintes locales

Contrastant avec ce premier régime marqué par une économie majoritairement locale, la révolution industrielle et la transition urbaine provoquent une nouvelle dynamique dans le processus d'urbanisation. Ce nouveau régime semble *libéré* de toutes les contraintes locales par la révolution des transports et l'invention de la vitesse (STUDENY, 1995) qui permet une mise en réseau des ressources à une nouvelle échelle. Cette mise en réseau, qui était donc restreinte jusque-là par la faible capacité des transports, leur coût, leur lenteur et les aléas des routes, provoque une accélération et une généralisation de la croissance, en levant les limites à la croissance. Selon BAIROCH (1985), le coût des transports à l'époque pré-industrielle était encore de l'ordre de 4,5 kg de céréales par km et par tonne (0,9 par voie d'eau, 0,3 à 0,4 par cabotage maritime). Ce coût limitait considérablement la portée des échanges terrestres de marchandises. F. Braudel indique qu'à l'époque de la Révolution française, la quasi-totalité des ressources consommées dans un village provenaient d'un tout petit rayon de quelques km, "*le territoire visible depuis le clocher de l'église*". En 1826 encore, dans l'"*État isolé*", l'agronome propriétaire THÜNEN (1966) estimait que la portée maximale des transports autour d'un marché urbain était de 350 km environ pour un attelage de bœufs.

La réduction des coûts de transport par un facteur 100 entre 1800 et 1900 (BAIROCH, 1985) participe à l'explosion des échanges liée à la seconde phase de "mondialisation" émergeant au long du XIX^e siècle et patente au début du XX^e siècle (ARRAULT, 2007). Cette révolution des transports est en fait indissociable des progrès des sciences et des techniques, de l'éducation, de l'élévation progressive des niveaux de vie, mais aussi des stabilisations politico-étatiques qui, dans certaines régions du monde, vont permettre une accélération rapide de l'urbanisation lorsque ces progrès divers seront mis en connexion :

"La construction progressive d'un système de peuplement de plus en plus hiérarchisé, avec des contrastes de plus en plus grands entre les dimensions et le degré de complexité de ses éléments, est une conséquence de l'adaptation progressive, historique, d'un système initialement bâti en fonction d'une certaine vitesse de circulation et qui s'est transformé pour permettre des vitesses plus grandes. Ce faisant, le système a aussi permis que les sociétés se libèrent

progressivement de la dépendance écologique à l'égard des ressources offertes par leur site. Les aléas, les incertitudes menaçant la survie et le développement social s'en sont trouvés réduits, grâce à l'extension considérable des possibilités de substitution et de complémentarité des ressources, sans oublier l'appel possible aux disponibilités de sites de plus en plus éloignés. Les systèmes de peuplement réalisent ainsi une nécessité évolutive, en adaptant constamment la structure spatiale des territoires à la contrainte de réduction des incertitudes de l'environnement immédiat, soit ce que se donnent en permanence pour objectif les sociétés humaines. Ces systèmes sont les instruments privilégiés du processus par lequel l'humanité *transforme l'étendue en espace*, imprime peu à peu des propriétés anthropologiquement définies pour réduire les rugosités *naturelles* de la surface de la terre en créant un milieu anthropisé, qui homogénéise les conditions du *savoir habiter* (Reymond, 1981)."
(PUMAIN et MORICONI-EBRARD, 1997, p.130)

La conséquence de cette dynamique libérée par les réseaux est une formidable expansion du nombre des villes, de leur dimension, de leur emprise territoriale et un accroissement considérable de leurs inégalités de taille, que nous simulons avec le modèle SimpopNet.

En conclusion, nous cherchons à reproduire, dans l'évolution des villes, non pas ce qui relève de leur histoire, bien trop complexe et spécifique selon les territoires, mais ce qui constitue l'essentiel de leur dynamique. L'essentiel de leur dynamique est cette partie de l'évolution comparable d'un territoire à l'autre et relativement prévisible du fait de la très grande généralité des processus impliqués. Deux grands régimes dans les dynamiques de peuplement et le processus d'urbanisation peuvent être ainsi décrits. Le premier régime, insufflé par l'apparition du mode de vie urbain, s'est caractérisé par une population urbaine minoritaire, fortement contrainte par les ressources dont elle pouvait localement disposer. Le deuxième régime, tout juste entamé il y a deux siècles par la transition urbaine, s'amorce par le passage d'une économie majoritairement agricole à une économie majoritairement industrialisée puis tertiaire qui s'affranchit des contraintes locales grâce à la mise en réseau des économies locales. Par définition ce régime de dynamique urbaine, apparemment sans autre contrainte que celle du rythme de la croissance de la population mondiale et sans limite en termes d'accumulation et de concentration de richesses, est très récent et n'a pas encore, ou tout juste, atteint sa phase de stabilité. À moins qu'une nouvelle transition, que d'aucuns nomment déjà la *transition écologique*, suscitée par la finitude des ressources mondiales, ne viennent perturber ce régime urbain...

1.5 Des faits stylisés à unifier au sein d'une théorie urbaine

1.5.1 Les faits stylisés de la dynamique des systèmes de villes

Toutes ces observations générales sur l'organisation et la dynamique des systèmes de villes peuvent se résumer en vue de leur formalisation par des modèles de simulation en dix grands faits stylisés :

1. Tous les systèmes de villes présentent une *distribution très inégalitaire des tailles de villes*, qui peut être modélisée par une fonction puissance ou log-normale.
2. Cette distribution s'organise sur le territoire suivant une *spatialisation de type chris-tallérienne* au sein de laquelle l'espacement entre les plus grandes villes est plus grand que l'espacement entre les plus petites villes.
3. La taille démographique d'une ville est une bonne approximation de la diversité des fonctions urbaines qu'elle présente (sa complexité).
4. Les villes *interagissent* les unes avec les autres. Ces interactions sont très bien modélisées par des *modèles gravitaires* : plus les masses de lieux en interaction sont grandes et plus la force d'interaction est forte, les flux vers les masses les plus grandes sont supérieurs ; plus la distance séparant les lieux est petite et plus la force d'interaction est faible. Ces interactions sont donc sources d'échanges mais aussi de compétition pour la captation de population, de richesses et d'innovations.
5. Les innovations se répandent dans le système de villes suivant une *diffusion hiérarchique descendante* : les plus grands centres sont les premiers servis.
6. Les innovations sont le *moteur de croissance*, l'acquisition d'une innovation profite à une ville. Mais le gain relatif pour la ville dépend du stade de diffusion de l'innovation lors de l'acquisition : plus l'adoption se fait précocement et plus le gain est grand.
7. Il existe une auto-catalyse entre urbanisation et innovation : la grande taille des villes favorise l'innovation, et l'innovation favorise la croissance des villes, en plus de se favoriser elle-même.
8. Avec l'augmentation progressive des vitesses, l'espace d'interaction des villes s'est peu à peu contracté, modifiant les conditions des échanges. Les plus petites villes subissent un court-circuitage qui handicape leur croissance et les plus grandes, premières connectées au réseau innovant de transport, étendent leurs activités et influences économiques.

-
9. Tous ces processus (d'interactions interurbaines, d'émergence d'innovations, de diffusion spatiale des innovations et de contraction de l'espace-temps) répartis de façon inégalitaire dans le système de villes, sont caractéristiques de la dynamique du système de villes. Ils sont moteurs d'une *complexification* progressive de la diversité fonctionnelle du système et surtout d'une *sélection géographique* qui se traduit par une *hiérarchisation* du système de villes, c'est-à-dire une concentration progressive de la population et des richesses dans les plus grandes villes.
 10. Le processus de hiérarchisation est accompagné d'un processus d'urbanisation des sociétés, qui a connu jusqu'à maintenant *deux grands régimes de dynamique des villes*. Un premier régime essentiellement contraint par les ressources localement disponibles et un deuxième régime apparemment libéré de ces contraintes locales grâce à l'accélération et l'amplification des échanges et du commerce des ressources dont le manque limitait la croissance urbaine dans le régime antérieur.

Tous ces faits stylisés et processus présentés ci-dessus selon des énoncés déterministes connaissent bien entendu des variations importantes et ne sont valides qu'en moyenne ou en tendance. Il sera nécessaire d'intégrer dans les modèles des fluctuations stochastiques qui simulent l'effet de la variabilité et de la diversité de leurs expressions localisées.

1.5.2 Une théorie évolutive urbaine

Beaucoup de théories explicatives du fait urbain ont été formulées. Elles traitent généralement d'une ou de l'autre des grandes régularités que nous avons mis en évidence dans ce chapitre. L'article de PUMAIN et ROBIC (1996) propose un aperçu de ces théories urbaines, en se concentrant sur les théories qui *pensent d'emblée la ville comme un objet géographique* (c'est-à-dire non comme entité isolée mais comme élément d'un territoire ou d'un système de villes) et qui se fondent sur des *propositions, sinon vérifiées par l'expérience, du moins compatibles avec le plus grand nombre d'observations*. Trois grandes formes de la réflexion théorique des villes sont distinguées : la ville comme élément d'une couverture territoriale, la ville comme nodalité dans un réseau de circulation et finalement, la ville comme adaptateur dans un complexe évolutif. Dans la première forme de théorie, la ville domine un territoire, elle est considérée dans un processus de pavage de l'espace. Du rôle militaire (place forte), politique (pavage administratif) ou marchand (théorie des lieux centraux, aires de marché et zones d'influence), c'est la notion d'une couverture territoriale par les villes d'un espace rural qui guide ces conceptions. Cependant leur fondement peut être remis en cause : dans la mesure où la majorité de la population est maintenant urbaine, il paraît aberrant de faire dépendre toute l'organisation urbaine sur les services rendus aux populations rurales des régions complémentaires. Dans la deuxième forme de théorie, c'est la notion d'*innervation*, fondée sur une circulation et un réseau

qui prévaut. Dans ces perspectives, les villes sont considérées comme des relais et des étapes sur les réseaux de circulations (E. Reclus) ou comme des nœuds inter-connectés par des réseaux d'échange (H. Mackinder, P. Vidal de la Blache : "*les villes naissent au carrefour des routes*", "*un site urbain correspond à un lieu d'échange*", cité par PUMAIN et ROBIC (1996)). Cette conception de la ville faisant partie d'un réseau est à l'origine de la modélisation des flux circulant entre les villes par des modèles gravitaires et de la modélisation de la situation et du poids d'une ville dans le système par des modèles de potentiels. Cependant, ces deux formes de théorie (ville comme couverture territoriale et ville comme nœud dans un réseau) n'expliquent pas la transformation et la complexification des fonctions urbaines au cours du temps, ni l'adaptation du système de villes à la contraction de l'espace-temps. Une troisième forme de théorie intègre le point de vue dynamique et évolutif du système de villes : ce sont celles qui pensent la ville comme adaptateur du changement social, c'est-à-dire comme une structure qui évolue pour s'adapter aux innovations de tout type.

La théorie évolutive des systèmes de villes (PUMAIN et MORICONI-EBRARD, 1997 ; PUMAIN, 2000 ; PUMAIN, 2006 ; PUMAIN, 2011) cherche à unifier et compléter les deux premières approches de théorie urbaine en montrant comment les principales propriétés des systèmes de villes (ou faits stylisés que nous avons mis en évidence) sont le produit de processus évolutifs généraux d'adaptation :

"La forme de la trame des villes, leur dimension et leur espacement, résultent de processus plus ou moins continus d'*adaptation* des villes à une évolution du dimensionnement de l'espace par les vitesses de circulation, et d'*ajustement* de leur contenu à l'évolution sociale, fonctionnelle et technique."

(PUMAIN et MORICONI-EBRARD, 1997, p.129)

Cette théorie se fonde sur le principe que chaque ville ne peut être comprise de façon isolée, mais en fonction des multiples réseaux de relation qu'elle développe et dont elle dépend pour sa croissance. Ces réseaux ont progressivement rendu les villes mutuellement interdépendantes : ils permettent d'échapper aux limitations des ressources locales tout en obligeant, par émulation et concurrence avec les autres villes, à innover. L'innovation, qui circule entre les villes en réseau par échange d'informations, de savoirs et techniques, est le moteur du développement urbain. Ainsi la principale caractéristique dynamique des systèmes de peuplement urbains semble être la concurrence entre les centres, pour la captation et la création de richesses, par l'échange, l'innovation (anticipation) et l'adoption (imitation) des innovations. Cette concurrence est inégale et la capacité d'adaptation au changement de chaque ville est liée à la position relative des villes dans le système, en terme de taille des villes qui est la traduction de l'histoire de la ville et de son accumulation de richesse (diffusion hiérarchique des innovations dans le système de villes). La concurrence interurbaine, parce qu'elle suscite l'innovation, conduit à repousser continuellement

les facteurs limitatifs de la croissance des villes. Elle est à l'origine du processus de division sociale du travail, suscite de nouvelles spécialisations urbaines, et, parce qu'elle touche chaque entité, conduit à un processus de croissance et de transformation de l'ensemble des villes du système. Cette expansion quantitative et qualitative généralisée apparente l'urbanisation à un processus de diffusion-expansion : les diffusions successives d'innovation dans le système sont le moteur d'une croissance distribuée, multiplicative, répartie entre toutes les villes. Cette croissance distribuée reproduit un processus pseudo-stochastique, fait de petits ajustements qui adaptent (ou corrigent) en permanence la place des villes dans le système, chacune tendant à conserver sa position relative. Les réseaux de communication et de transport interurbain sont le support des échanges interurbains. Les transformations spatiales et historiques de ces réseaux provoquent des modifications dans les portées des relations au sein du système de villes qui changent les conditions des échanges interurbains auquel le système doit s'adapter.

Finalement, cette théorie permet d'expliquer à la fois la résilience et la capacité adaptative des systèmes de villes. Leur résilience peut être illustrée par la persistance de la hiérarchie des villes sur le très long terme et cela malgré de très grandes catastrophes, comme la grande peste qui a divisé par deux la taille de la population européenne au XIV^e siècle mais qui n'a pas pour autant déstabilisé l'ordre établi de la hiérarchie urbaine. Cette résilience semble s'accroître avec le temps, dans la mesure où les interactions entre les villes semblent empêcher leur dépérissement ou leur disparition, plus fréquente autrefois suivant les conflits ou les catastrophes naturelles. La résilience d'un système de ville s'explique par la capacité adaptative de coévolution des villes extrêmement proactive, par un processus concurrentiel fait d'imitation et d'anticipation pour la valorisation des richesses. De plus, la hiérarchisation croissante du système de villes peut s'expliquer par le jeu des échanges interurbains et ses règles d'inégale concurrence : la mise en réseau des villes et l'évolution de ses conditions donnent un avantage concurrentiel systématique aux entités à fort potentiel d'interaction, ce qui entérine une forme de distribution de la croissance qui renforce la hiérarchie existante. Les villes en systèmes remplissent la fonction d'adaptateur des territoires au changement social, technologique, économique et culturel. Cette fonction d'adaptateur est cependant principalement une propriété émergente et résultante de processus auto-organisés constitués d'interactions entre les multiples entités du système. La fonction d'adaptateur social historique est reconnue implicitement par le fait que le même mot *ville* est toujours employé pour identifier des formes d'habitat plurimillénaires allant de quelques milliers à quelques millions d'habitants.

Conclusion : Des faits stylisés pour la modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement

Dans ce chapitre nous avons défini un ensemble de faits stylisés statiques et dynamiques. L'organisation stylisée des systèmes de villes est caractérisée par une distribution statistique de tailles de villes fortement inégalitaire (suivant une distribution puissance ou log-normale), leur répartition spatiale très organisée (suivant une distribution de type cristallin), et une répartition des activités urbaines très hiérarchisée (en fonction de lois d'échelle). La dynamique stylisée du système de villes est dominée par deux grands processus qui sont inter-connectés. Le processus d'urbanisation se traduit par une augmentation du nombre et de la taille des villes, mais surtout par une augmentation de la part relative (taux d'urbanisation) de la population urbaine dans le système. Ce processus a connu deux grandes phases, que nous caractérisons ici comme deux grands régimes de dynamique des villes. Le processus de hiérarchisation se traduit par une concentration progressive des populations et des richesses dans les grandes villes, c'est-à-dire une augmentation de la place relative des grandes villes dans le système. Ce processus est lié à d'autres processus plus spécifiques qui s'opèrent suivant une *sélection géographique* : interactions interurbaines, émergence des innovations, diffusion spatiale des innovations et contraction de l'espace-temps. L'ensemble de ces grandes caractéristiques peuvent être assemblées et comprises au sein d'une théorie évolutive des systèmes de villes qui pense l'urbain comme système adaptatif du changement social grâce à l'interaction et aux échanges entre les villes.

Cet ensemble de faits stylisés nous permet de déterminer un cadre pour la modélisation et la simulation des dynamiques des systèmes de peuplement. Ils pourront en effet servir de point de départ pour caractériser un état de système ou encore un mécanisme à développer et implémenter. Ils pourront aussi servir à la validation par la confrontation des résultats obtenus par la modélisation à ceux attendus suivant la théorie de la dynamique stylisée des systèmes de villes. La hiérarchisation des systèmes de villes est un sujet qui a déjà suscité beaucoup d'intérêt de la part des modélisateurs. Comme nous le verrons dans le deuxième chapitre, ces modèles proposent différentes formes de simulation de l'inégale répartition de la croissance. Mais ces modèles présentent des lacunes que nous proposons de combler avec deux nouveaux modèles : SimpopLocal et SimpopNet.

La dynamique des villes : Des modèles statistiques à la simulation dans un laboratoire virtuel

"If you didn't grow it, you didn't explain it"

J. Epstein et R. Axtell, 1996

2.1	La loi rang-taille comme enjeu de modélisation : une modélographie .	89
2.1.1	L'obsession de la loi rang-taille	89
2.1.2	Trois processus élémentaires de croissance conduisant à la formation de distributions fortement hiérarchisées	90
2.1.2.1	L'effet de la prise en compte en amont d'une distribution déjà fortement dissymétrique	90
2.1.2.2	Le processus de croissance multiplicatif ou l'effet proportionnel	91
2.1.2.3	Le processus d'attachement préférentiel	92
2.1.2.4	Le faible pouvoir explicatif des modèles aléatoires .	93
2.1.3	Les modèles à processus économiques : les externalités positives et négatives d'agglomération	96
2.1.4	Les modèles à processus spatiaux : le jeu des interactions interurbaines	99
2.1.5	Les modèles de hiérarchisation de systèmes de peuplement : la famille des modèles Simpop	103

2.1.6	Vers de nouveaux modèles de dynamiques de systèmes de villes	109
2.2	La mise en place d'un laboratoire virtuel pour l'élaboration des nouveaux modèles de simulation de la dynamique des villes	114
2.2.1	Les défis des modèles multi-agents	114
2.2.2	Vers une démarche de modélisation itérative et assistée par le calcul intensif	121
2.2.3	Un véritable laboratoire virtuel développé par une équipe interdisciplinaire	125
2.2.4	Deux modèles de hiérarchisation de système de peuplement .	129
2.2.4.1	Un cadre théorique	129
2.2.4.2	Un cadre descriptif	132

Introduction : comment simuler l'organisation de la distribution rang-taille des villes ?

"The fact that all realistic rank-size distributions contain acceptable underlying hierarchical structures but not all acceptable hierarchical structures are capable of forming the basis for rank-size distribution suggests that the rank-size distribution has a greater validity, particularly if the empirical evidence is taken into account. For this reason, compatibility with the rank-size distribution might be considered as a further test in the evaluation of hierarchical model of city size."

(PARR, 1970, p.246)

Après plus de 40 ans, cette citation reste d'une grande actualité. Dans le chapitre précédent nous avons énuméré les grands faits stylisés caractérisant les systèmes de villes et leur dynamique de croissance. De tous ces faits, le plus universel, celui qui est resté au centre de l'attention des chercheurs, est la forme de la distribution statistique des tailles de villes dans un système de villes. Si cette distribution, qui est donc la première caractéristique des systèmes de villes, est restée un sujet de recherche fécond depuis des décennies, c'est qu'il n'en existe toujours pas de modèle(s) explicatif(s) satisfaisant(s). Il n'existe pas de modèle génératif qui rende compte de la distribution rang-taille des systèmes de villes et qui fasse consensus parmi les chercheurs, à l'intérieur d'une discipline ou entre les disciplines (économie, géographie, sciences régionales, etc). Au point que P. Krugman, prix Nobel d'économie pour avoir montré « les effets des économies d'échelle sur les modèles du commerce international et la localisation de l'activité économique » (théorie à la base de nombreux modèles économiques de système de villes), y consacre un article "*Confronting the mystery of urban hierarchy*" et un chapitre dans le livre *The spatial economy : cities, regions and international trade* (FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001, chp.12). Dans ces deux écrits il admet : "*At this point we are in the frustrating position of having a striking empirical regularity with no good theory to account for it*" KRUGMAN (1996, p.399).

Ainsi, et jusqu'à maintenant, les recherches sur la modélisation de systèmes de villes se sont concentrées sur la conception de modèles dont les mécanismes seraient capables d'engendrer des distributions de tailles de villes fortement hiérarchisées. En première partie de ce chapitre sont présentés et comparés un ensemble de modèles candidats à l'explication de cette grande régularité. Nous ne proposons ici qu'un échantillon de tous les modèles qui ont pu être publiés sur la question, mais cet échantillon se veut représentatif des grands courants et des grandes hypothèses qui fondent les modèles de cette littérature. Nous nous limiterons aux modèles qui conçoivent les distributions des tailles de villes

comme le résultat d'un processus de croissance¹. Nous présenterons en section 2.1.2 les trois processus dynamiques les plus simples pouvant être à l'origine de la formation de distributions de type loi puissance ou log-normale. Ces processus, qui sont aléatoires pour la plupart, n'ont pas les fondements socio-économiques qui leur octroieraient les pouvoirs explicatifs recherchés. C'est pourquoi chaque discipline a ensuite cherché à produire des modèles qui respectaient ses grandes hypothèses fondatrices. Ont ainsi été produits des modèles issus des théories économiques (section 2.1.3) et des modèles incorporant des processus d'interaction spatiale (section 2.1.4), dont notamment une famille de modèles, les modèles Simpop, spécialisés dans la modélisation dynamique du processus continu de hiérarchisation progressive (section 2.1.5).

Chacun des grands types de modèles présentés ici a des atouts et des faiblesses pour simuler la dynamique des systèmes de villes. Parmi eux, la modélisation par les systèmes multi-agents offre un cadre de réflexion et des libertés de modélisation particulièrement bien adaptés à l'étude de la simulation de la dynamique urbaine. En particulier, les modèles Simpop ont prouvé que les hypothèses théoriques qu'ils simulent, adaptées de la théorie urbaine évolutive, sont capables de rendre compte d'un grand nombre de caractéristiques dynamiques de systèmes de villes. Ils présentent aussi des inconvénients, liés aux méthodes utilisées pour le développement de systèmes multi-agents et à la conception de modélisation géographique développée pour le projet Simpop. C'est pourquoi nous proposons dans une deuxième partie de ce chapitre d'élaborer un laboratoire virtuel pour la simulation des dynamiques de systèmes de villes. La définition d'une démarche de modélisation et la conception d'outils de développement et d'exploration de modèles (section 2.2.2) permettent de répondre aux principaux défis de la modélisation des systèmes multi-agents (section 2.2.1). Rassemblés au sein de la plateforme de modélisation SimProcess, cette démarche de modélisation et les outils qu'elle mobilise forment donc un véritable laboratoire virtuel pour la modélisation des dynamiques de systèmes de villes. Ce laboratoire est le fruit d'une longue et intense coopération inter-disciplinaire (section 2.2.3). Cette structure de modélisation nous a permis de définir les fondements de deux nouveaux modèles (section 2.2.4), conçus pour combler certaines lacunes dans la simulation de l'organisation de la distribution rang-taille des villes mises en lumière dans la première partie du chapitre.

1. Des modèles explicatifs statiques ont été proposés (Loi du moindre effort de Zipf, maximisation de l'entropie, etc.), mais ils ne constituent pas des théories suffisantes pour expliquer l'évolution des systèmes de villes (PUMAIN, 1982, chp.2).

2.1 La loi rang-taille comme enjeu de modélisation : une modélographie

2.1.1 L'obsession de la loi rang-taille

Les distributions fortement inégalitaires des tailles de villes sont peut-être la régularité empirique la plus marquante en sciences sociales, bien qu'elle reste encore inexplicée. Son ajustement par des lois puissances ou des lois log-normales a démontré sa grande robustesse aux tests empiriques (c.f. section 1.1.1), pourtant ces ajustements théoriques sont toujours le sujet de nombreux travaux de recherche dans différentes disciplines en vue de produire de meilleurs tests statistiques ou d'ajustement plus fins. Bien qu'il faille le vérifier de façon plus systématique, il semble que le rapport aux formes d'ajustement des distributions rang-taille de villes varie d'une discipline à l'autre. D'un côté, certains économistes paraissent très attachés à la *loi de Zipf* (ZIPF, 1949). Partant du constat que les distributions empiriques rang-taille des systèmes de villes peuvent être bien modélisées par des distributions puissance de coefficient très proche de 1 (c.f. section 1.1.1), ils semblent assimiler cette régularité statistique (valeur du coefficient égale à 1) au fait stylisé à reproduire de façon presque impérative par la modélisation. Si certains articles l'affichent jusque dans leur titre : "*Zipf law and the growth of cities*" (GABAIX, 1999a), "*The return of Zipf : towards a further understanding of the rank-size distribution*" (BRAKMAN et al., 1999) ou encore "*Emergent cities : micro-fondation of Zipf's law*" (AXTELL et FLORIDA, 2006), cet objectif est aussi explicite dans de nombreux autres travaux économiques (DURANTON, 2012 ; DIMOU et SCHAFFAR, 2011 ; KRUGMAN, 1996 ; FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001 ; GABAIX et IOANNIDES, 2004). D'un autre côté, les géographes et les archéologues, utilisent plutôt la *loi de Zipf* comme un outil de comparaison entre distributions empiriques plutôt que comme la signature d'un système de villes optimal, qui serait à l'équilibre. Les travaux des géographes et archéologues s'intéressent à l'interprétation des divergences et des écarts entre distributions théoriques et/ou empiriques (SANDERS, 2012). Les propositions de modèles dynamiques de hiérarchisation de systèmes sont plus rares dans ces disciplines, mais dans ces cas, si l'objectif est bien de modéliser une distribution fortement hiérarchisée, l'obtention de distributions puissance ou log-normale, quel que soit leur paramétrage, est un test de validité satisfaisant (ALLEN et SANGLIER, 1979 ; WHITE, 1978 ; SANDERS, 1992 ; SANDERS et al., 1997). Ainsi, quelque soit l'ajustement choisi et le paramétrage ciblé, les distributions rang-taille théoriques fortement hiérarchisées sont au centre de l'attention. Elles sont de véritables enjeux de modélisation : leur engendrement par des modèles dynamiques est un test de validation primordiale, ces modèles accédant ainsi au statut de nouveaux candidats à l'explication de cette régularité empirique encore inexplicée.

Tout l'enjeu des modèles dynamiques de hiérarchisation d'un système de peuplement se situe dans la modélisation d'une croissance différenciée des entités constitutives de ce peuplement (villages ou villes). Pour qu'il y ait hiérarchisation, c'est-à-dire un différentiel de tailles de plus en plus fort entre les entités du système, il faut qu'il y ait des écarts entre les croissances de toutes les entités, de sorte que certaines soient plus chanceuses que d'autres et croissent plus rapidement que les autres. C'est ce que PUMAIN (1982) a nommé la *distribution ou répartition de la croissance*. Le succès de la modélisation d'une distribution de la croissance au sein d'un système de peuplement se mesure dans les distributions fortement inégalitaires de type puissance ou log-normale qui sont ainsi engendrées. Il a été mis en évidence qu'au moins trois grands processus élémentaires de croissance peuvent mener à ce type de distribution : l'effet de la prise en compte en amont d'une distribution déjà fortement dissymétrique, le processus de croissance multiplicatif, et le processus d'attachement préférentiel.

2.1.2 Trois processus élémentaires de croissance conduisant à la formation de distributions fortement hiérarchisées

2.1.2.1 L'effet de la prise en compte en amont d'une distribution déjà fortement dissymétrique

KRUGMAN (1996) a suggéré qu'une distribution puissance des tailles de villes de type *loi de Zipf* pouvait émerger de la forme de la distribution des avantages *naturels* situés dans les aires d'influence de ces villes. Si ces avantages ont un effet sur la croissance des villes (au point qu'elles s'adaptent à eux) et que ces avantages sont distribués de façon très inégalitaire dans le système de villes, alors ils pourraient être à l'origine de la distribution très inégalitaire des tailles de villes. P. Krugman s'appuie sur l'exemple de la distribution de la taille et de la longueur des grands cours d'eau des États-Unis, qui suit une distribution puissance avec un coefficient proche de 1. Il émet ainsi l'hypothèse que les arrières-pays ou *hinterlands* (qui découlent de la disposition de chaque ville sur ces cours d'eau) des villes (nécessairement toutes portuaires pour bénéficier des avantages de l'accessibilité par les cours d'eau) suivent cette même distribution et conditionneraient ainsi la distribution de tailles urbaines. GABAIX et IOANNIDES (2004) construisent un modèle de croissance économique relativement simple pour reproduire cet effet et montrent comment il est possible de rattacher proportionnellement la croissance de la population de chaque ville au montant des avantages naturels du site de la ville, en reliant de façon linéaire ces aménités naturelles à l'activité économique (en termes de capital et nombre d'emplois) qui peut en découler.

Ce processus de croissance peut sembler quelque peu déterministe, un peu trop simplifié au regard des processus socio-économiques de la croissance urbaine pour devenir un

candidat sérieux à l'explication de la forme de la distribution rang-taille des villes. Les deux processus suivants incorporent au contraire des effets aléatoires et ont un pouvoir explicatif largement plus discuté dans la littérature.

2.1.2.2 Le processus de croissance multiplicatif ou l'effet proportionnel

Ce processus a été formalisé par GIBRAT (1931) sous le nom de l'*effet proportionnel* et appliqué à des domaines très variés par R. Gibrat lui-même dans sa thèse et les travaux qui y sont attachés tels que la distribution de la taille des entreprises, des revenus, des tailles de villes, etc. Son objectif n'était pas tant de donner un modèle explicatif mais plutôt une justification théorique de la génération statistique de ce type de distribution.

R. Gibrat a montré qu'il suffisait que la croissance des entités d'un système (de villes par ex.) soit proportionnelle à leur taille et que les taux de croissance soient indépendants de la taille de ces entités et les uns des autres dans le temps (auto-corrélation temporelle nulle) pour qu'une distribution log-normale des tailles se dessine au bout d'un certain nombre d'itérations du modèle de croissance. La démonstration a été reprise de nombreuses fois (PUMAIN, 1982 ; FAVARO, 2007 ; DURANTON, 2012 ; DIMOU et SCHAFFAR, 2011).

Appliqué à la croissance d'une ville, le modèle de croissance par effet proportionnel s'écrit :

$$P_t = P_{t-1} \cdot (1 + r_t)$$

avec P_t la population d'une ville à l'instant t et r_t une variable aléatoire qui désigne le taux de croissance de cette ville entre $t - 1$ et t . Si l'ensemble des villes d'un système suit ce processus de croissance, la distribution des tailles de villes est de plus en plus dissymétrique (i.e. avec des écarts de plus en plus grands entre les tailles) avec les pas de simulation successifs.

Dans les applications de ce modèle aux croissances des villes, la variable aléatoire r_t suit une loi normale. Cependant FAVARO (2007) a montré que ce processus de croissance proportionnelle à la taille engendrait des distributions log-normales de tailles de villes avec de nombreuses autres lois de distribution du taux croissance. On peut en conclure que la loi log-normale est robuste et générale. Des distributions log-normales sont engendrées par des processus de croissance qui peuvent varier fortement dans le détail mais dont le principe reste le même : une distribution des taux de croissance indépendante de l'état (passé, présent ou futur) du système, mais une croissance de chaque entité proportionnelle à sa taille. Un deuxième modèle de croissance aléatoire permet également d'engendrer des distributions fortement hiérarchisées.

2.1.2.3 Le processus d'attachement préférentiel

Dans le modèle multi-agents Sugarscape (EPSTEIN et AXTELL, 1996) (voir annexe A), des agents se déplacent dans un paysage de sucre. Les dotations de sucre sont inégalement réparties dans l'espace. Chaque agent consomme du sucre pour son métabolisme mais, s'il en trouve suffisamment, il peut aussi constituer des réserves. À l'état initial, tous les agents ont la même quantité de réserves en sucre (à l'état initial, la distribution de la richesse en sucre est uniforme). Au fur et à mesure de la simulation, cette distribution devient de plus en plus inégalitaire avec une minorité de très riches agents et une majorité d'agents pauvres. Les agents qui ont été plus chanceux au début de la simulation pour emmagasiner précocement le sucre (parce qu'ils étaient dans des régions riches en sucre ou parce qu'il présentaient un métabolisme plus efficace), ont ensuite eu plus de facilité à consolider de grandes réserves (car ils bénéficiaient toujours des avantages initiaux et subissaient moins les effets de mauvaises conditions momentanées grâce à leur réserve dans laquelle ils pouvaient piocher). Ce modèle, très simple de premier abord, illustre les rouages d'un mécanisme d'*avantage cumulatif* qui conduit d'une distribution uniforme à une distribution fortement hiérarchisée par l'amplification progressive de petites différences initiales. Il montre ainsi l'effet de *path dependency* dont dépend ce processus d'avantage cumulatif. *Path dependency* ou la dépendance au chemin est une théorie qui explique comment un ensemble d'actions ou de décisions passées peut influencer sur les actions ou les décisions futures : les états présents et futurs du système dépendent de ses états passés (ARTHUR, 1994).

Le mécanisme d'avantage cumulatif a été appliqué à la croissance des systèmes de villes avec le modèle proposé par SIMON (1955), qui permet d'en donner une démonstration formelle. Dans ce modèle, la croissance de chaque ville est supposée discrète, c'est-à-dire par petits incréments. À chaque pas de simulation apparaît un nouvel incrément (un bloc) qui a une probabilité π de former une nouvelle ville et une probabilité $\pi - 1$ d'être ajouté à une ville existante. Dans ce dernier cas, la probabilité δ de choisir une localisation i est proportionnelle à sa taille P_i (i.e. du nombre de blocs qui la constitue) tel que : $\delta_i = P_i / \sum_j P_j$. Ce mécanisme génère une distribution puissance des tailles de villes. Le coefficient de la loi puissance tend vers la valeur 1 (*loi de Zipf*) lorsque la probabilité d'apparition d'une nouvelle ville tend vers 0. Cependant, dans ces conditions, le modèle de Simon converge vers une *loi de Zipf* avec un exposant proche de 1 au bout d'un temps infini, c'est-à-dire au bout de l'ajout d'un nombre infini de blocs (KRUGMAN, 1996 ; DURANTON, 2006). Par ailleurs, le modèle n'est pas capable de produire des distributions de type fonction puissance dont l'exposant est inférieur à 1 (ce qui est pourtant parfois le cas pour certains systèmes de villes), car il faudrait pour cela des probabilités d'apparition de nouvelles villes négatives (KRUGMAN, 1996 ; DURANTON, 2006 ; FAVARO, 2007).

Ce mécanisme d'avantage cumulatif a aussi été appliqué dans le domaine des réseaux

sociaux par BARABASI et ALBERT (1999) sous le nom d'*attachement préférentiel*. En partant de l'observation que de nombreux réseaux sociaux présentent des lois d'échelles, les auteurs proposent un modèle de génération de graphe qui permet de reproduire ces caractéristiques fondamentales. À partir d'un réseau à m_0 nœuds, de nouveaux nœuds sont ajoutés un à un au graphe, proportionnellement au degré de connexité déjà atteint par chacun des nœuds. Chaque nouveau nœud n est relié au réseau par la génération de $m(\leq m_0)$ liens avec des nœuds déjà connectés. La probabilité $P_{n \rightarrow i}$ que le nœud n soit relié au nœud i dépend du degré de connectivité k_i du nœud i (calculé ici comme le nombre de lien du nœud i), et s'écrit : $P_{n \rightarrow i} = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$. La croissance itérative de ce réseau mène à un état stable (indépendant du temps de simulation) dans lequel la distribution du nombre de liens des nœuds du réseau suit une loi puissance d'exposant $\gamma = 2,9 \pm 0,1$. Cette croissance par attachement préférentiel donne donc un exemple de mécanisme incrémentiel, i.e. par ajouts successifs de nœuds et donc de liens dans le réseau, qui conduit à des distributions statistiques de type puissance.

L'avantage cumulatif ou l'attachement préférentiel est un principe de croissance par ajout successif d'entités qui s'organisent dans le système suivant sa configuration évolutive. Il a été appliqué à plusieurs reprises à des systèmes très différents. D'abord formalisé par YULE (1925) pour étudier la répartition des genres classés suivant le nombre de leur espèces, il a été repris sous divers noms : avantage cumulatif pour les citations scientifiques (SOLLA PRICE, 1976), attachement préférentiel pour la croissance des villes avec le modèle de SIMON (1955) et pour la croissance de réseaux sociaux (BARABASI et ALBERT, 1999). Ce processus permet, après un temps de simulation infini d'engendrer des distributions puissance qui s'approchent des distributions de type *loi de Zipf*.

2.1.2.4 Le faible pouvoir explicatif des modèles aléatoires

Les deux processus de croissance (par effet proportionnel et par attachement préférentiel) décrivent des modèles de dynamique de système dont la croissance des entités, ici des villes, est proportionnelle à leur taille. Fondamentalement, ces deux modèles de croissance aléatoire sont très similaires et simulent le même principe de croissance fondé sur les hypothèses du modèle de Gibrat (le taux de croissance appliqué est une variable aléatoire et indépendante) (FAVARO, 2007 ; DURANTON, 2012), en l'intégrant soit de façon directe et continue par croissance multiplicative (modèle de Gibrat), soit à travers une croissance discrète par augmentation de la population d'une ville par blocs, ajoutés proportionnellement à sa taille (modèle de Simon). Pourtant, les deux distributions finales ainsi générées sont sensiblement différentes, essentiellement pour le bas de la hiérarchie, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (c.f. section 1.1.1). Il a été montré qu'une petite variation dans les prémisses du processus de croissance permet de passer

d'une distribution à l'autre, voire à une combinaison des deux (BARBUT, 1998 ; GABAIX, 1999b ; FAVARO, 2007 ; REED, 2002).

Ainsi, ces deux modèles aléatoires (ou probabilistes) sont fondés sur un processus de croissance qui suit un même principe d'ajouts de quantités proportionnelles à la taille au cours de chaque intervalle de temps. L'explication qui est apportée à la distribution empiriquement observée de la taille des villes est donc de nature purement statistique : les taux de croissance urbaine seraient ou apparaîtraient comme aléatoires et indépendants de la taille de la ville ou de sa structure. Cette interprétation ne signifie pas que les taux de croissance des villes sont effectivement indépendants de toutes les caractéristiques des villes, mais elle souligne simplement que sur le long terme et au niveau macroscopique du système de villes, un tel processus de croissance aléatoire peut reproduire un fait stylisé majeur des systèmes de villes. Il est donc possible de rendre compte de la structure finale d'un système de villes par la simulation sans devoir tenir compte d'aucun fondement théorique de type social, géographique, politique ou économique, sur la dynamique ou le fonctionnement des systèmes de villes.

Les distributions fortement dissymétriques de type loi puissance ou loi log-normale sont très courantes dans les systèmes naturels comme dans les systèmes sociaux, si bien que SIMON (1955) a été amené à écrire que seul un même processus statistique probabiliste pourrait engendrer une si grande diversité de distributions empiriques de type puissance : *"Its appearance is so frequent, the phenomena in which it appears so diverse, that one is led to the conjecture that if these phenomena have any properties in common it can only be a similarity in the structure of the underlying probability mechanism"*. Cependant, comme l'avance PUMAIN (1982, p.69), peut-être que la fascination pour ces distributions rang-taille amène à se poser *"la question de la validité scientifique d'une interrogation dont le point de départ ne serait que la forme d'une distribution statistique"* : du fait de sa récurrence universelle, cette distribution est peut-être tout aussi *"normale"* qu'une distribution de type loi normale sur laquelle les scientifiques s'attardent beaucoup moins pour y chercher des explications. À cet égard, il paraît alors plus pertinent d'orienter les recherches vers la prise en compte des grandes observations empiriques et vers l'incorporation de théories sur le fonctionnement des systèmes de villes dans les modèles candidats à l'explication de la dynamique de systèmes :

"Scaling laws often are viewed as *over identified* : they can be generated by a wide range of distinct models. It is essential to select specifications that integrate in the model a significant part of the existing knowledge about towns and cities"

(PUMAIN, 2004c, p.1)

Les modèles simulant les dynamiques de croissance de systèmes de villes que nous présentons dans la suite de ce chapitre s'inscrivent dans cette perspective. Une des stratégies

adoptées est de chercher à décrire des mécanismes génératifs qui pourraient reproduire les grandes tendances observées grâce aux données empiriques qui ne sont pas modélisées par les modèles de croissance aléatoire.

Le modèle de Gibrat a été appliqué à plusieurs reprises sur des jeux de données géographiques historiques (PUMAIN, 1982 ; GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990 ; BATTY, 2001 ; BRETAGNOLLE, MATHIAN et al., 2000 ; PUMAIN, BAFFI et al., 2014) permettant ainsi la comparaison entre les données obtenues par simulation et les données obtenues par observation des systèmes réels. Ces études viennent conforter les résultats d'études empiriques sur la distribution des taux de croissance dans les systèmes de villes et montrent de grands écarts entre les processus de croissance simulés par le modèle de Gibrat et celui observé dans les systèmes réels :

- Il a été observé, de façon ponctuelle mais sur des périodes suffisamment longues pour que cela soit significatif, des auto-corrélations spatiales et/ou temporelles de certains taux de croissance et de très légères corrélations positives ou négatives (en fonction des systèmes et des périodes étudiés) entre les taux de croissance et les tailles de villes (PUMAIN, 1982 ; GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990 ; PAULUS, 2004 ; SWERTS et PUMAIN, 2013 ; PUMAIN, BAFFI et al., 2014). Ces résultats indiquent que les hypothèses de croissance aléatoire du modèle de Gibrat ne sont pas tout le temps vérifiées dans les systèmes réels.
- Le processus de croissance simulé par le modèle de Gibrat ne permet pas de simuler des vitesses de croissance et de hiérarchisation réalistes si on tient compte de moyennes et écarts-types des taux de croissance paramétrés sur des observations empiriques. En effet comme il a été rappelé dans la section précédente, la convergence vers une distribution log-normale ne se réalise qu'au bout d'un temps infini de simulation (KRUGMAN, 1996 ; GABAIX, 1999b ; BATTY, 2001). BRETAGNOLLE, MATHIAN et al. (2000) ont montré que pour obtenir des hiérarchisations représentatives des systèmes réels lors de simulations de croissance de systèmes sur 300 ans, les écart-types pour le tirage aléatoire des taux de croissance simulés doivent être au moins deux fois plus grands que ceux observés. De la même manière le modèle de Gibrat n'est pas capable de produire des systèmes qui présenteraient des indices de primatie suffisamment élevés pour refléter ceux observés dans les systèmes de villes mondiaux (MORICONI-EBRARD, 1993).

Ainsi tel que l'écrivent GUÉRIN-PACE et PUMAIN (1990, p.12) : "*même faibles, les écarts au modèle sont trop systématiques et souvent assez significatifs. D'autres aspects du processus doivent donc être pris en compte.*" BRETAGNOLLE, MATHIAN et al. (2000) analysent ces déviations systématiques par rapport aux hypothèses du modèle de Gibrat comme la preuve qu'il existe un processus de sélection qui affecte la dynamique de croissance des

systèmes de villes, qui donne un avantage, certes très faible mais bien effectif, aux plus grandes villes, creusant de la sorte les écarts entre les plus grandes et les plus petites villes plus rapidement que ne le ferait un processus de croissance indépendant de la taille. Par ailleurs il faut remarquer que sur le plan théorique le modèle de Gibrat contredit le principe même de villes en systèmes en supposant une croissance aléatoire qui ne dépend pas des interactions qu'elles peuvent avoir entre elles et qui ont donné lieu à la construction de ce concept systémique².

Le modèle de Gibrat offre cependant une première approximation de la dynamique des systèmes de villes, qui doit servir de support de réflexion pour la conception de nouveaux mécanismes susceptibles de mieux refléter les autres grandes tendances observées pour la croissance. Plusieurs disciplines se sont soumises à cet exercice de spécification théorique de la croissance et de la hiérarchisation urbaine, en prenant chacune des hypothèses bien différentes pour construire les modèles de simulation. La figure 2.4 offre une vue globale de la revue de modèles que nous présentons.

2.1.3 Les modèles à processus économiques : les externalités positives et négatives d'agglomération

KRUGMAN (1996) résume en trois questions centrales l'organisation de la pensée économique classique sur le *mystère de la hiérarchie urbaine* : Pourquoi existe-il une si grande variété de tailles de villes ? Pourquoi la distribution des tailles suit une loi d'échelle de type puissance ? Pourquoi l'exposant de cette loi puissance est-il très proche de 1 ? Le constat d'une hiérarchie régulière des tailles de villes paraît plutôt contradictoire avec les théories économiques classiques de la ville. Ces théories prédisent une taille urbaine optimale qui refléterait un équilibre entre des forces centripètes induites par les externalités positives de la concentration des activités en un même lieu (telles que les économies d'agglomération) et des forces centrifuges induites par des externalités négatives causées par une trop grande concentration (telles que les congestions ou la montée des prix). Le constat d'une diversité des tailles est d'autant plus intrigant pour cet économiste que cette diversité s'organise selon une loi d'échelle d'exposant 1 : cette valeur d'exposant indique des rendements d'échelle constants avec la taille, c'est-à-dire qu'au niveau macro-géographique, tout se passe comme si la croissance d'une ville était indépendante de sa taille, alors même que les modèles économiques de la ville se fondent sur des rendements d'échelle qui ne sont pas constants (FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001, chp.12). Cet exposant est

2. Le modèle de Gibrat, bien qu'aléatoire, postule cependant de façon implicite une forme d'interdépendance entre les entités du système simulé : l'ordre de grandeur des taux de croissance de chaque entité est le même par définition, il est modélisé par une variable aléatoire qui conserve une même loi de tirage aléatoire durant la simulation. Ce modèle ne peut donc être appliqué qu'à un système dont les villes partagent une même probabilité de croissance.

considéré par ces économistes comme très stable dans le temps et reflète l'organisation de systèmes de villes depuis la révolution industrielle. Cependant, il n'existe pas encore de modèles économiques qui expliquent pourquoi des structures économiques aussi diverses que le système de villes américain et le système de villes indien, qui présentent des formes différentes de tension entre des forces centrifuges et centripètes, produisent tout de même des résultats macroscopiques aussi similaires (KRUGMAN, 1996). Les modèles économiques qui tentent de répondre à ces questions sont classés en deux grandes catégories : les modèles déterministes et les modèles aléatoires (DIMOU et SCHAFFAR, 2011 ; DURANTON, 2012).

Les modèles économiques déterministes répondent plus particulièrement à la première question de P. Krugman. Au centre de ces modèles se trouve le jeu d'équilibre entre des économies d'agglomération et les coûts urbains qu'elles génèrent. Ils présentent tous des relations en forme de courbes en cloche entre les gains nets de l'agglomération et la taille démographique comme le montre la figure 2.1, avec au sommet de la cloche le point *O* qui indique la taille optimale de la ville (FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001 ; DIMOU et SCHAFFAR, 2011 ; DURANTON, 2012). Ces modèles proposent une explication et une prédiction de la croissance démographique en fonction d'un ensemble de facteurs explicatifs ou caractéristiques des villes. Comme le montrent DURANTON (2012) et DIMOU et SCHAFFAR (2011), les caractéristiques prises en compte varient d'un modèle à l'autre (avantages géographiques, concentration du capital humain ou du savoir, diversité économique, effet de la distance sur les externalités, etc.). Généralement les modèles déterministes "*mettent en relation l'émergence et la croissance démographique d'une ville avec sa spécialisation productive*" (DURANTON, 2012).

Le modèle de HENDERSON (1974) est souvent cité comme précurseur de ce type de modélisation : les *Henderson-type urban system models* (KRUGMAN, 1996 ; FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001). Ces modèles génèrent une variété de tailles de villes à partir de l'hypothèse que les externalités positives de l'agglomération sont spécifiques à chaque secteur d'activité mais que les externalités négatives dépendent de la taille de la ville, indépendamment de ce qu'elle produit. Cette asymétrie a deux conséquences. D'abord, comme les effets d'agglomération ne dépendent que des effets de la spécialisation économique, les industries qui ne profitent pas des retombées économiques de ses voisines n'ont pas intérêt à se rapprocher et à risquer de subir les effets négatifs de la concentration, si bien que chaque ville finit par se spécialiser dans la production d'un bien. Ensuite, si l'intensité des économies d'agglomération varie énormément d'un secteur économique à l'autre, alors les courbes en cloche représentant les gains nets sectoriels en fonction de la taille urbaine désignent des optimaux de taille qui dépendent du secteur économique dominant, comme le montre l'exemple théorique du graphique de droite de la figure 2.1. En ajustant les prix de façon à ce que l'avantage net de localisation d'un ménage soit le même pour toutes les villes, les modèles de type *Henderson* présentent à l'équilibre

un système urbain au sein duquel la taille optimale des villes diffère en fonction de leur spécialisation économique.

Ainsi les modèles de type *Henderson* apportent des explications économiques à la première question de P. Krugman sur l'inexistence d'une taille optimale unique des villes. Ce modèle conduit donc à une succession de tailles urbaines optimales, de la même façon que la théorie des lieux centraux (c.f. section 1.1.4) produit une distribution des tailles de villes en palier, ce qui ne reflète pas les observations empiriques pour lesquelles les distributions des tailles de villes sont continues. C'est peut-être là l'écueil des modèles déterministes économiques : ils ne parviennent pas à expliquer comment des processus de croissance peuvent conduire à des distributions régulières de type *loi de Zipf* (KRUGMAN, 1996 ; FUJITA, KRUGMAN et VENABLES, 2001 ; DURANTON, 2012 ; DIMOU et SCHAFFAR, 2011). Ainsi ces modèles économiques qui "*forgent une théorie de l'émergence des villes (à travers le jeu des forces d'agglomération et de dispersion), une théorie de structuration économique de villes (localisation des secteurs économiques) et une théorie de croissance démographique des villes (selon leur type)*" (DURANTON, 2012, p.18) ne parviennent pas à générer des distribution rang-taille conformes aux observations empiriques, qui restent donc un *mystère pour les économistes* (KRUGMAN, 1996).

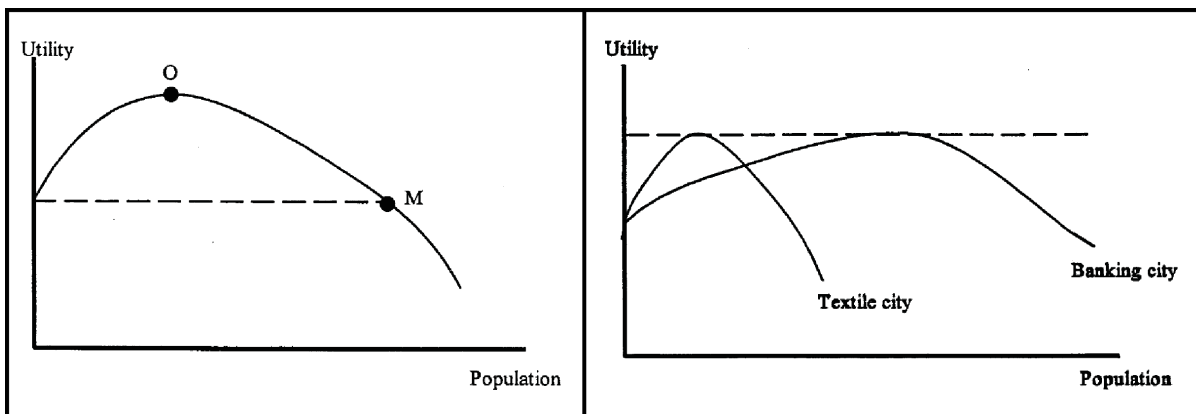


Figure 2.1 – Relation caractéristique des modèles de type *Henderson* entre le gain net d'agglomération et la taille démographique (KRUGMAN, 1996, p.403 et 404)

Un deuxième courant en économie prend le contre-pied de la tradition classique de la modélisation de l'équilibre entre externalités positives et négatives, en considérant que la croissance des villes ne dépend pas de leur taille. Ces modèles cherchent à associer des processus économiques aux modèles de Gibrat et Simon afin de générer des distributions plus proches des observations empiriques. Dans le modèle de ECKHOUT (2004), chaque ville est caractérisée par une productivité par travailleur. Cette productivité est touchée par des effets d'externalités positives et négatives en fonction la taille de la ville. La libre mobilité des travailleurs permet d'égaliser pour toutes les villes le produit de la productivité et du nombre de travailleurs, si bien que la taille de chaque ville apparaît comme une

fonction de la productivité. Suivant le modèle de Gibrat, des chocs de productivité (indépendants et identiquement distribués) font évoluer la productivité de chaque ville qui, avec le temps, converge vers une distribution de type log-normale. Sous l'hypothèse de libre mobilité des travailleurs, la distribution log-normale de la productivité des villes se confond avec la distribution log-normale des tailles de villes. Ce modèle adapte donc deux effets générateurs à une hypothèse économique classique (les jeux des externalités d'agglomération) pour expliquer la distribution des tailles de villes : le processus multiplicatif et l'effet de la prise en compte en amont d'une distribution déjà fortement dissymétrique (décrits dans la section 2.1.2). De façon similaire, GABAIX (1999b) adapte les deux effets, l'attachement préférentiel et l'effet proportionnel, aux mêmes hypothèses classiques d'externalités d'agglomération. Son modèle simule une croissance de la population totale par ajouts successifs de ménages dans le système. Leur localisation (qui est fixe) est déterminée, lors de leur introduction dans le système, par une fonction d'utilité qui dépend des salaires et des aménités de chaque localité. Les aménités locales augmentent en fonction de chocs exogènes distribués de façon aléatoire ce qui a un impact sur les niveaux des salaires locaux qui s'y ajustent. La combinaison de ces effets (chocs aléatoires, ajustement des salaires, mobilité imparfaite, croissance globale du système) engendre une distribution log-normale des tailles de villes.

Les modèles de ECKHOUT (2004) et GABAIX (1999b) sont des exemples de modèles économiques aléatoires qui ont pour principe d'intégrer les effets de chocs exogènes permanents sur les facteurs explicatifs de la taille des villes et ainsi de donner une interprétation économique aux modèles de Gibrat et Simon. Cependant, ce sont bien les processus de Gibrat ou de Simon qui sont reproduits sous un habillage économique, ces modèles montrent simplement qu'il est possible de poser sur ces processus purement statistiques un discours économique, moyennant des hypothèses fortement contraignantes (DIMOU et SCHAFFAR, 2011 ; DURANTON, 2012), qui ne sont par ailleurs pas très réalistes.

2.1.4 Les modèles à processus spatiaux : le jeu des interactions interurbaines

Plutôt que de considérer la diversité des tailles de villes comme la résultante optimale d'un jeu entre des forces d'agglomération et de dispersion à intensités variables, d'autres modèles considèrent la diversité des tailles de villes comme le produit de processus d'interactions spatiales entre les villes. Dans ces modèles, les interactions spatiales sont interprétées comme les mécanismes d'une compétition entre les villes, moteur de la croissance, pour attirer les activités économiques et accumuler population et richesse. Les différentiels d'attractivité sont à l'origine d'une asymétrie dans les interactions interurbaines qui produisent des différentiels de croissance et donc à terme une différenciation

hiérarchique. Ces différentiels de potentiel de croissance entre les villes sont modélisés suivant deux grandes tendances : des différences d'attractivité sur les flux migratoires entre villes (souvent décrits en fonction du profil économique de chaque ville) (WILSON, 1969 ; FAVARO, 2007 ; WEIDLICH et HAAG, 1988) ou des différences d'attractivité sur les activités économiques (qui engendrent des différentiels de réussite sur les marchés d'échange) (WHITE, 1978 ; ALLEN et SANGLIER, 1979 ; SANDERS et al., 1997). Tous ces modèles participent du courant épistémologique des théories de l'auto-organisation. Ces approches permettent de proposer une formalisation de la structuration du système à l'échelle macro-géographique en la considérant comme le résultat des interactions entre les entités du niveau inférieur, c'est-à-dire les villes du niveau méso-géographique ou les individus du niveau micro-géographique (PUMAIN, 1998a ; PUMAIN, 1998b ; WILSON, 2010). Les modèles présentés dans cette section sont décrits à partir d'équations différentielles non-linéaires qui régissent les comportements de chaque ville (ou lieu) en réaction à l'état du système à partir de la description des boucles de rétroaction qui lient l'évolution des différents attributs des villes (population, profil économique, etc.).

Les modèles gravitaires d'interactions spatiales suggèrent une forme de modélisation de la distribution de la croissance menant à une hiérarchisation du système. Le modèle de WILSON (1969), adapté à la croissance de systèmes de villes par FAVARO (2007, chp.3), en est un bon exemple. Il simule l'intensité des flux migratoires interurbains en fonction de l'attractivité relative de chaque ville. L'attractivité de chaque ville est fonction de son profil économique (par rapport à celui de toutes les autres villes du système) mais aussi de la distance la séparant des autres villes (plus la distance séparant deux villes est grande et moins le flux migratoire de l'une à l'autre sera fort). Pour que le modèle, qui s'emploie habituellement dans un système où la population totale a une croissance nulle, ne simule pas uniquement une simple redistribution de la population, J.-M. Favaro y a ajouté un mécanisme de croissance naturelle qui suit un modèle de type Gibrat. La croissance itérative d'une ville dépend donc à la fois de la somme des flux migratoires entrants et sortants et d'un taux de croissance naturelle aléatoire indépendant de la taille. Un processus de hiérarchisation s'opère au terme de ces deux mécanismes de croissance urbaine. Cependant cette hiérarchisation est d'autant plus intense que la contrainte de la distance sur les échanges est importante, ce qui peut paraître contre-intuitif : plus les échanges interurbains sont difficiles et plus forte est la proportion de la population du système qui se concentre dans une unique ville (FAVARO, 2007)...

Le modèle de WEIDLICH et HAAG (1988) propose une autre modélisation de l'effet des migrations interurbaines sur un système de villes. Cette modélisation utilise l'approche par équation maîtresse, qui lie de façon explicite la probabilité de changement d'état d'un individu du niveau micro-géographique à l'évolution de variables caractérisant l'état du système au niveau macro-géographique (PUMAIN, 1998a ; SANDERS, 1992). Dans le modèle de WEIDLICH et HAAG (1988) appliqué aux migrations inter-régionales, une équation

générale du mouvement définit la probabilité de passage d'un état possible du système à un autre, en terme de forme de répartition possible de la population dans les régions du système. Cette probabilité dépend des caractéristiques de mobilité des individus du système considéré. Des valeurs moyennes sont utilisées pour paramétrer le modèle. Les paramètres de mobilité globale, de facilité d'interaction ainsi que les attractivités des lieux sont estimés par le modèle à partir d'une série de matrices de migrations entre les lieux. Ensuite, les préférences attachées aux lieux sont calculées à partir d'un modèle de régression des attractivités en fonction de la taille des lieux. Ces résidus ou préférences migratoires positives ou négatives sont ensuite expliqués par un modèle de régression multiple à partir des indicateurs disponibles sur les régions ou les villes concernées. Ces caractéristiques sont ainsi estimées sans hypothèse *a priori* sur leurs facteurs explicatifs de la mobilité et sont analysées *a posteriori*. Les différences d'attractivité engendrent une asymétrie des flux migratoires à l'origine des différentiels de croissance entre les villes (PUMAIN et SANDERS, 2013). Ce modèle permet de réaliser des simulations prédictives sur les distributions des migrations et sur l'évolution de la répartition spatiale des populations en fonction d'hypothèses sur l'évolution des comportements individuels de mobilité. SANDERS (1992) l'a appliqué à un large échantillon de villes françaises (données observées entre 1954 et 1982) et a produit des simulations prédictives d'évolutions possibles du système en fonction de plusieurs hypothèses sur l'évolution des comportements de mobilité. Ce modèle permet de réaliser des travaux prédictifs, mais sa construction par estimation des paramètres descriptifs *"ne permet pas néanmoins d'expliquer véritablement les causes fondamentales de l'évolution, ni de mettre en évidence les mécanismes qui sont à la base du changement"* (SANDERS, 1992, p.240).

Des modèles plus riches en concepts urbains théoriques et explicatifs ont été également développés. Ils se fondent par exemple sur l'explicitation en termes économiques de l'attractivité des villes et de l'effet de son inégale répartition sur l'évolution du système. Le modèle dynamique de WHITE (1978) cherche à retrouver une hiérarchie des lieux centraux à partir de l'interaction spatiale entre les entreprises localisées dans les lieux centraux et les consommateurs répartis dans tout l'espace du système simulé. L'évolution, par croissance cumulative, de chaque lieu dépend de la réussite économique de chaque secteur économique localisé en ce lieu. Cette réussite dépend elle-même du coût et de la demande pour ce secteur, qui sont calculés en fonction de la population que ce secteur touche et de la concurrence localisée dans les autres lieux. Cette réussite provoque des évolutions dans les distributions et la composition des secteurs qui va donc en retour changer les conditions de la concurrence. WHITE (1978) montre que le modèle à deux secteurs d'activité est capable, sous certaines conditions bien particulières de paramétrage (rapport entre population d'une ville et population desservie, contraintes de coût, effet dissuasif de la distance du modèle gravitaire définissant les conditions d'interaction entre les lieux), de produire des distributions rang-taille de lieux centraux de type fonction puissance.

Les degrés d'inégalité simulés sont cependant plus forts que ne l'indiquent les données empiriques. ALLEN et SANGLIER (1979) présentent un autre modèle de développement de système de lieux centraux. L'évolution simulée de la hiérarchie urbaine résulte elle aussi de l'interaction entre la distribution des activités économiques et de la distribution de la population mais par un mécanisme de migrations successives qui fait évoluer la répartition de la population. Dans ce modèle, la distribution spatiale des activités économiques s'adapte à la distribution spatiale de la population, qui représente leur marché. Ces marchés redéfinissent la distribution spatiale de la population par modification de la localisation des emplois, qui peut finalement rétroagir sur la distribution des activités économiques par effet de saturation des marchés par exemple. La croissance générale du système est assurée par un processus aléatoire d'entrée sur le marché d'activités concurrentes. La croissance démographique de chaque lieu est compilée à partir du contraste entre son activité économique effective au temps t et son potentiel d'activité déduit de son attractivité au temps t suivant une fonction de croissance logistique. Ce modèle permet de bien simuler des distributions de tailles de centres urbains fortement hiérarchisées mais, dans ce cas encore, avec des degrés de hiérarchisation bien plus forts qu'attendus.

Ces modèles de dynamiques urbaines, formulés à partir de processus spatiaux et selon des équations différentielles (continues ou discrètes) non-linéaires, caractérisent des dynamiques à forte capacité de bifurcation, souvent chaotiques ou instables (SANDERS, 1992; PUMAIN, 1998a; PUMAIN, 1998b). Ils sont difficiles à étudier, car ils sont souvent sans solution analytique et nécessitent le calcul et la reproduction d'un grand nombre de simulations pour générer un panel de comportements qui soient représentatifs des dynamiques possibles. Les modèles les plus sobres en hypothèses relatives à la théorie urbaine ont pu être appliqués à des systèmes de villes réels comme l'a fait SANDERS (1992) pour le modèle de WEIDLICH et HAAG (1988), mais, comme elle le précise, les modèles plus riches sur le plan théorique comme le modèle de ALLEN et SANGLIER (1979) sont beaucoup plus difficiles d'application car *"l'absence de solution analytique complique l'évaluation des paramètres et les essais de prévision prennent alors un caractère plus aléatoire"* (SANDERS, 1992, p.239). Par conséquent ces modèles offrent plutôt une utilité *"didactique et heuristique essentielle, pour mettre à l'épreuve les propositions théoriques et les connaissances acquises sur le changement spatial"* (PUMAIN, 1998a, p.358) en permettant d'étudier les effets de certaines hypothèses sur les comportements d'un système théorique *toutes choses égales par ailleurs*. S'ils permettent de simuler de nombreux comportements différents dont une forme de hiérarchisation du système, ces modèles ne peuvent simuler des évolutions qui seraient engendrées par l'introduction de nouveautés et d'innovations dans le système : ils sont *"impuissants à rendre compte de l'émergence de nouvelles fonctions et des nouveaux éléments qui obligent à réviser la nomenclature employée pour décrire l'état des systèmes"* (PUMAIN, 1998a, p.358). Les modèles par équations différentielles ne peuvent donc pas se transformer eux-mêmes, or, comme nous l'avons montré dans le

premier chapitre, c'est pourtant une des caractéristiques majeures de l'évolution des systèmes de villes : *les émergences successives d'innovations sont le moteur de la dynamique des villes* (c.f. section 1.5). La nécessité de rendre compte de l'apparition du changement pour se conformer à une théorie urbaine évolutive a poussé des chercheurs du laboratoire Géographie-Cités à s'intéresser à une autre forme de modélisation qui s'appuie sur une formalisation informatique d'intelligence distribuée : la simulation individu-centré. Ce changement de paradigme méthodologique a conduit à la proposition de modèles par Automates Cellulaires (AC) (FAVARO, 2007 ; FAVARO et PUMAIN, 2011) et par Systèmes Multi-Agents (SMA) (les modèles de la famille Simpop). À partir du modèle de WILSON (1969), FAVARO (2007) a ainsi proposé un automate cellulaire qui simule la hiérarchisation d'un système de villes grâce à l'apparition cyclique et endogène d'innovations économiques et leur diffusion dans le système. Le modèle conduit à une distribution des tailles de villes qui suit de façon cyclique, en résonance avec l'apparition des innovations, une loi log-normale, ce qui pourrait correspondre aux observations empiriques au moins pour la France sur les 150 dernières années. Cependant, la hiérarchie simulée des villes est très sensible aux chocs de l'apparition des innovations et présente une forte instabilité qui est peu représentative des systèmes de villes. Les modèles de la famille Simpop proposent une autre formalisation du changement et ont été appliqués avec succès à des systèmes de villes réels. En s'appuyant sur le formalisme multi-agents qui rend très facile l'introduction de nouveautés dans le système, les modèles Simpop font eux-aussi de l'innovation le moteur de la croissance urbaine.

2.1.5 Les modèles de hiérarchisation de systèmes de peuplement : la famille des modèles Simpop

Le projet de recherche Simpop a débuté dans les années 1990 grâce à une collaboration entre des géographes du laboratoire Géographie-cité et des informaticiens du laboratoire LAFORIA (Paris 6), pour appliquer le paradigme de la modélisation multi-agents à l'étude de l'évolution des systèmes de peuplement dans le temps long. Cette première collaboration a abouti à un modèle de simulation de l'évolution d'un système de peuplement sur 2000 ans : le modèle Simpop. Il est devenu le premier modèle multi-agents développé en géographie. Une famille de modèles s'est ensuite constituée autour d'un même concept de modélisation géographique. Le modèle Simpop a été réadapté et affiné sous la forme du modèle générique SIMPOP2 qui a été appliqué à des systèmes de villes réels sous quatre formes : SIMPOP2 Europe (1300-2000), SIMPOP2 États-Unis (1650-2000), SIMPOP2 Afrique du Sud (1650-2000) et Eurosim (1950-2050) (Figure 2.2).

Les modèles Simpop sont conçus pour reproduire par la simulation des faits stylisés définis par extrapolation d'observations sur une variété de systèmes réels (SANDERS, 2006)

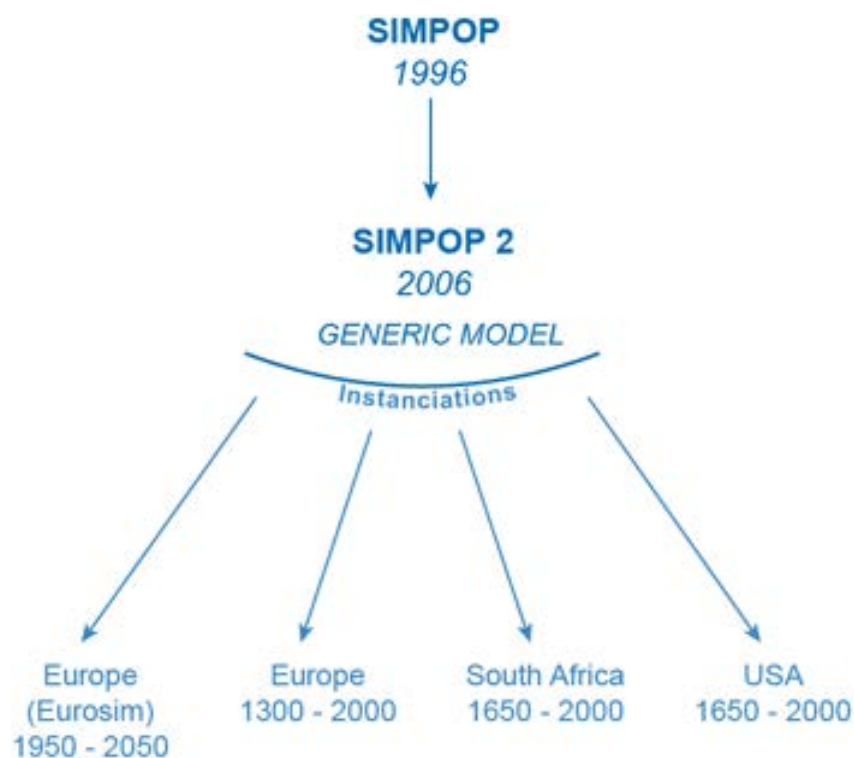


Figure 2.2 – Arbre généalogique des modèles de la famille Simpop, source : www.simpop.parisgeo.cnrs.fr

(c.f. chapitre 1). À l'origine de la construction des modèles Simpop se trouve une théorie explicative de l'évolution des systèmes de villes : la théorie évolutive urbaine, dont les fondements ont été explicités dans la section 1.5.2 de cette thèse. L'enjeu du projet de recherche Simpop, débuté dans les années 1990 mais encore d'actualité aujourd'hui avec les différents programmes de l'ERC GeoDiverCity, est de modéliser les propositions de cette théorie pour la tester par la simulation. Elle se fonde sur des hypothèses de comportements d'interactions à l'échelle des entités villes (compétition, coopération, adaptation) qui par leurs compositions conduiraient à l'émergence d'une organisation et d'une structuration très stable du système de villes. En ce sens, le paradigme de modélisation multi-agents se présente comme particulièrement pertinent pour ce projet. En effet, le concept d'agent est parfaitement adapté à la modélisation d'une entité géographique *ville* qui soit (LOUAIL, 2010, p.106) : autonome et décisionnelle (pour la modélisation des réseaux d'échanges interurbains, une ville favorisera les partenaires commerciaux avec lesquels les échanges ont déjà été profitables), gouvernée (villes soumises à des réglementations ou des orientations stratégiques du niveau supérieur), capable d'interagir (à travers les réseaux d'échanges), et dont la structure est évolutive (avec la complexification des fonctions urbaines au cours du temps). La question de modélisation posée est donc la suivante : la simulation des comportements théorisés au niveau méso-géographique des villes peut-elle conduire à engendrer des structures au niveau macro-géographique du système de villes qui soient

similaires aux phénomènes observés ? Ainsi, les modèles Simpop tentent de reproduire la génération et l'évolution d'une structuration de la hiérarchie des villes à partir d'un ensemble de règles de fonctionnement et d'interactions au niveau des entités *villes* :

"Simpop2 a été conçu comme un modèle générique simulant l'évolution d'un ensemble de villes en interactions sous des hypothèses de concurrence, formalisées par le fonctionnement spatialisé d'un marché d'échanges. Ces villes sont rendues hétérogènes par la diversité de leurs fonctions socio-économiques et par leur plus ou moins bonne insertion dans les réseaux d'échanges."

(BRETAGNOLLE, GLISSE et al., 2007, p.1)

Dans ces modèles, la dynamique des villes résulte de trois grands processus :

- ***L'apparition de vagues d'innovation successives*** qui complexifient peu à peu les fonctions urbaines. Au moins quatre grandes vagues sont identifiées (le grand commerce maritime et fluvial, la première révolution industrielle, la révolution industrielle de l'électricité et l'automobile, et la révolution des techniques de l'information). Les dates d'apparition de ces vagues sont modélisées par des règles exogènes à la simulation. L'acquisition et la diffusion des nouvelles fonctions urbaines sont simulées conformément aux théories de diffusion hiérarchique des innovations : les villes les plus grandes et les plus dynamiques bénéficient d'abord des innovations. Ce processus permet d'introduire la notion d'adaptation différenciée du système qui passe par une différenciation fonctionnelle de plus en plus complexe et hiérarchisée entre les villes.
- ***Le fonctionnement d'un marché d'échanges*** qui met en interaction par compétition/coopération les villes entre elles. À chaque fonction urbaine est associée la production d'un bien qui est mis en vente et en compétition avec les biens produits par les autres villes. La simulation d'un marché d'échanges permet d'évaluer la plus ou moins bonne insertion de chaque ville dans les réseaux d'échanges, et d'y adapter sa croissance en fonction de sa réussite.
- ***La modification de l'espace des échanges interurbains*** qui transforme les conditions des échanges du fait de l'évolution des vitesses de communications entre les villes. À chaque fonction urbaine est associé un paramètre de portée des échanges qui tient compte de cette évolution. Les variations des valeurs prises par ces paramètres sont pré-établies par le modélisateur. Ce processus permet de spatialiser les échanges tout en tenant compte de l'évolution historique de leur portée.

La croissance démographique de chaque entité urbaine est compilée à partir de deux éléments : le premier dépend du marché d'échange, et consiste en l'ajustement à la hausse

comme à la baisse de la population de la ville en fonction de sa réussite sur le marché d'échange à chaque pas de simulation ; le deuxième consiste en l'attribution d'une part de la croissance démographique historiquement observée (en moyenne, à l'échelle du système de villes). Ainsi la répartition de la croissance au sein du système de villes s'opère en fonction de la place relative de chaque ville dans le système et c'est donc suivant un mécanisme de compétition que la hiérarchisation urbaine se structure peu à peu. Ce deuxième élément ajouté dans le calcul de la croissance, associé au fait que les dates d'apparition des vagues d'innovation et que l'évolution des portées des échanges sont décidées *a priori* par le modélisateur, indiquent que plusieurs mécanismes de Simpop dépendent d'injections de données exogènes à la dynamique du modèle. Sans être totalement du type *data driven* (guidé par les données), et même loin de là, les modèles Simpop sont dits *guidés par le contexte* (LOUAIL, 2010) et la reproduction des trajectoires d'évolution des systèmes de villes est en partie guidée par un *recours aux sources* (population des villes, activités économiques, réseaux de transports). Le contexte dans lequel se déroule chaque simulation est donc déterminé à la fois par la carte initiale de localisation de chaque entité urbaine qui définit un territoire et par les données sur les contextes économiques et démographiques qui définissent l'histoire de ce territoire. Ce contexte sert aussi de cadre de simulation pour le calibrage de ces modèles, "*le système simulé étant évalué tout au long de son évolution par une confrontation avec [l]es données historiques*" (BRETAGNOLLE, GLISSE et al., 2007, p.2).

Le premier modèle Simpop (BURA et al., 1996 ; SANDERS et al., 1997) avait pour enjeu de simuler le passage d'un peuplement distribué en villages à un système de villes hiérarchisé sur 2000 ans. Ce but impliquait de mettre en évidence la nécessité des mécanismes et des paramètres miroirs de la théorie urbaine évolutive pour rendre compte de la concentration lente mais progressive de la population dans des entités géographiques de plus en plus grandes et aux profils économiques de plus en plus diversifiés. L'idée générale des mécanismes simulés vient d'être donnée mais une description plus détaillée est disponible en annexe A. Ce modèle Simpop est capable de produire des simulations montrant une organisation progressive de l'urbanisation du système qui se traduit par : une augmentation progressive (de forme exponentielle) de la population totale du système au cours de la simulation, une distribution rang-taille des lieux de peuplement qui se hiérarchise peu à peu, une diversification progressive des fonctions urbaines des plus grandes unités de peuplement, et une organisation spatiale rappelant la théorie des lieux centraux (figure 2.3). De plus, l'ensemble des simulations montre clairement le rôle fondamental de trois composantes pour obtenir un système de peuplement qui se développe, se hiérarchise et se complexifie progressivement en accord avec la théorie urbaine évolutive. Sans l'une de ces trois composantes, le système perd ses élans de croissance et dévie des trajectoires connues de hiérarchisation et de complexification des systèmes urbains :

- ***l'existence***, par les marchés d'échanges, ***d'interactions entre les lieux*** (il ne se construit pas de hiérarchie urbaine s'il n'y a pas d'échanges, de concurrence entre les villes) ;
- ***l'apparition exogène continue de nouvelles fonctions*** (sinon le système *dégénère*, il perd sa structure hiérarchique et s'homogénéise) ;
- ***des mécanismes stochastiques*** (même des conditions initiales identiques pour chaque établissement peuvent laisser le système évoluer vers une différenciation et une hiérarchisation, dès lors que des échanges sont établis et qu'un certain aléa crée des variations dans l'évolution de la population et de la richesse de lieux résultant du bilan de leurs échanges).

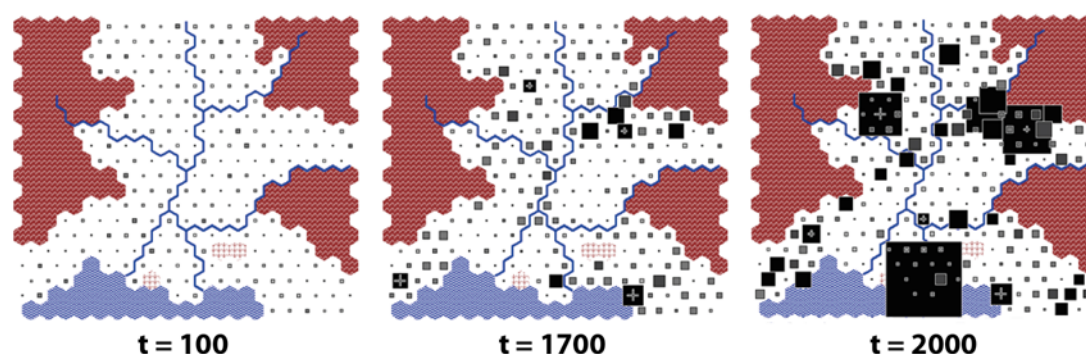


Figure 2.3 – Évolution d'un système de villes simulé par le modèle Simpop, *source* : UMR Géographie-Cités

Le développement du projet vers la construction du modèle SIMPOP2 (BRETAGNOLLE, DAUDET et PUMAIN, 2006 ; SANDERS, 2005 ; SANDERS, 2006 ; BRETAGNOLLE, GLISSE et al., 2007 ; BRETAGNOLLE et PUMAIN, 2010) cherchait à affiner l'implémentation du concept de modélisation géographique Simpop pour une meilleure prise en compte des hypothèses de la théorie urbaine évolutive. Avec la construction de bases de données très fiables sur l'évolution historique de systèmes de villes (Europe, États-unis, Afrique du Sud), il est possible d'avoir une idée précise des grandes tendances de croissance des systèmes de villes, mais aussi des spécificités de chaque système. Le modèle SIMPOP2 a été conçu dans l'optique de mettre en évidence ces grandes tendances, identiques dans l'évolution de tous les systèmes de villes mais aussi d'identifier les spécificités inhérentes à l'évolution historique de chaque système de villes observé. Un modèle générique a donc été conçu comportant les mécanismes de base requis pour simuler la hiérarchisation d'un système de peuplement qui ont été identifiés avec le premier modèle Simpop. Ce modèle générique a d'abord été appliqué à un territoire théorique rectangulaire comportant un semis aléatoire de villes symbolisant l'Europe. Les résultats de ce premier calibrage

montrent notamment que le modèle est capable de simuler le boom de croissance urbaine du XIX^e siècle, en conservant les mêmes règles d'interaction entre les villes mais à raison d'une modification évolutive discontinue de certains paramètres clés tel que les portées des échanges, les productivités, etc. Ce modèle générique a ensuite été instancié pour simuler des systèmes de villes ciblés (Europe, États-unis et Afrique du Sud). L'application du modèle à ces territoires spécifiques et aux passés très différents a nécessité l'introduction de règles propres à chaque territoire. Ces résultats montrent que le modèle générique est capable de s'adapter à des histoires différentes, prouvant ainsi la généralité des règles de développement des systèmes de villes traduites dans le modèle et confirmant la solidité de la théorie urbaine évolutive ainsi testée par la modélisation. Mais ils confirment aussi que les différences fondamentales de croissance dans les histoires de chaque système de peuplement (déjà connues) pouvaient être retrouvées par la simulation selon des interprétations cohérentes (BRETAGNOLLE et PUMAIN, 2010). Une quatrième application du modèle générique a pris la forme du modèle prédictif Eurosims (SANDERS, 2005 ; SANDERS, 2006). Il simule l'évolution du système de villes européen sur la période 1950-2050. Le modèle est d'abord calibré sur l'évolution historique du système de villes de 1950 à 2000, puis teste l'impact sur la structure finale en 2050 d'hypothèses relatives à l'évolution des conditions d'échanges entre les villes (effet de frontière, différentiels de croissance démographique, etc.).

Les modèles Simpop proposent une nouvelle forme de modélisation de la hiérarchisation des systèmes de villes grâce à une approche innovante par les systèmes multi-agents. Les mécanismes simulés sont générateurs de dynamiques produisant des caractéristiques de systèmes proches des observations. En formalisant la théorie évolutive des villes, ils représentent un nouveau candidat à l'explication du processus de hiérarchisation des systèmes urbains :

"La nouveauté, par rapport à d'autres modèles générateurs des hiérarchies urbaines [...], vient de ce que cette forme d'auto-organisation n'est plus représentée comme le résultat d'un processus statistique de croissance entre entités homogènes et indépendantes, mais comme une construction progressive fondée sur une variété d'interactions spatialisées entre des entités hétérogènes en coévolution."

(BRETAGNOLLE, GLISSE et al., 2007, p.23)

Cependant certaines caractéristiques des modèles Simpop nous poussent à vouloir continuer d'explorer ce champ ouvert par les premiers modèles Simpop pour proposer de nouveaux modèles suivant le même concept de modélisation géographique.

2.1.6 Vers de nouveaux modèles de dynamiques de systèmes de villes

Tout au long de cette première partie (sections 2.1.1 à 2.1.5), nous avons présenté un ensemble de modèles candidats à l'explication des dynamiques de croissance urbaines qui sont capables de conduire à la génération de la forme la plus caractéristique des systèmes urbains, leur distribution rang-taille. Des modèles à processus de croissance exclusivement aléatoires aux modèles intégrant des hypothèses issues des différentes théories du fait urbain, il existe tout un panel de modèles à processus explicatifs, qu'ils soient déterministes ou stochastiques, fondés sur l'optimisation ou sur l'auto-organisation. Parmi toutes les formalisations possibles, chacune présente des avantages et des défauts. La figure 2.4 propose une schématisation de l'organisation de l'ensemble de ces modèles. Les libertés de modélisation qu'offrent les systèmes multi-agents apparaissent comme très adaptées à la problématique de l'explication par la simulation de la dynamique des villes. Les modèles Simpop ont prouvé que les hypothèses théoriques qu'ils simulent, adaptées de la théorie urbaine évolutive, sont capables de rendre compte d'un grand nombre de caractéristiques dynamiques des systèmes de villes. Pourtant les modèles Simpop présentent eux-aussi des inconvénients, liés à la fois aux méthodes utilisées pour le développement de systèmes multi-agents mais aussi au concept de modélisation géographique développé pour le projet Simpop.

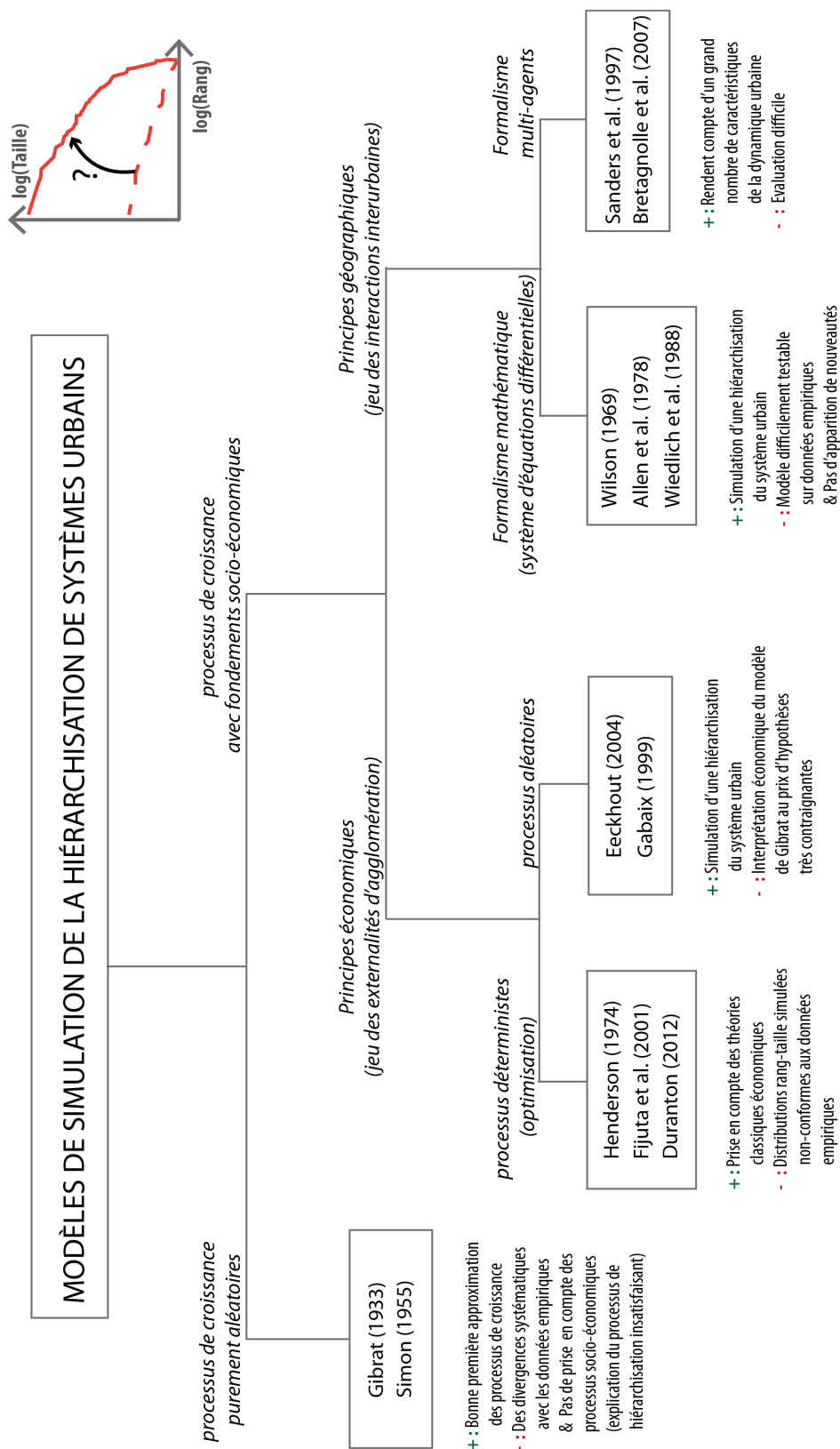


Figure 2.4 – Schématisation de la modélisation de la simulation du processus de hiérarchisation des systèmes de villes

Lors d'un stage de fin d'étude Ingénieur (SCHMITT, 2008), une campagne d'exploration du modèle SIMPOP2-Europe avait été mise en place et réalisée dans l'optique d'identifier un meilleur calibrage du modèle et d'apporter de nouveaux éléments dans la discussion de la validation du modèle. Le principe qui a prévalu pour le calibrage du modèle SIMPOP2 est celui d'un calibrage *guidé par les données* : le modèle devait reproduire des résultats mais aussi utiliser des paramètres dont les domaines de variation étaient conformes aux faits stylisés pour lesquels des quantifications avaient été obtenues par extrapolation des observations empiriques. Réalisé de cette façon, le calibrage des modèles Simpop était semblable à un travail de *validation externe* tel que décrit par (SANDERS, 2005 ; AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007) qui évalue l'adéquation (au moins en faits stylisés) entre le système simulé et le système observé. Le calibrage de SIMPOP2-Europe, bien que toujours incomplet, a apporté des conclusions satisfaisantes quant à la capacité du modèle à produire des comportements macroscopiques intéressants. À ce travail de calibrage se sont ajoutées des expérimentations d'analyses de sensibilité dont l'objectif étaient de vérifier l'adéquation entre les comportements simulés et les comportements qui étaient recherchés par la modélisation. Les analyses de sensibilité font partie de la *validation interne* (SANDERS, 2005 ; AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007) du modèle qui évalue la correspondance entre le système modélisé (les hypothèses de comportement) et le système simulé (son implémentation informatique). Faute de temps, les analyses de sensibilité réalisées dans le cadre de ce stage étaient très partielles et ciblées sur quelques paramètres clés du modèle. Elles ont pourtant aidé l'analyse des comportements du modèle. Mais ces études ont fait ressortir toute la complexité du modèle : tout en mettant en évidence un bon fonctionnement général des mécanismes étudiés, elles ont confirmé l'impossibilité d'une synthèse simple de la variabilité de comportements observés. Les phénomènes recherchés étaient bien perceptibles, mais les conclusions sur leur validité étaient toujours à relativiser par le petit nombre d'expériences réalisées, une réserve accentuée par la découverte de comportements inattendus et parfois contradictoires. Ce travail d'exploration des comportements du modèle a finalement mis en évidence une grande caractéristique des modèles multi-agents, la difficulté de leur validation.

Une simulation du modèle SIMPOP2-Europe met en interaction presque 5000 agents sur 70 pas de simulation, et le temps nécessaire pour la réalisation d'une simulation complète avoisine les cinq minutes. Les sorties de simulations décrivent l'évolution à chaque pas de temps de tous les attributs des agents villes pour chacune de leurs fonctions urbaines ainsi que les variables d'interaction associées aux échanges entre les villes : les données à traiter pour chaque sortie de simulation sont donc en masse considérable. Au regard de l'ampleur du nombre de paramètres des modèles Simpop (plus d'une cinquantaine), du temps de simulation de chaque expérimentation, du temps de traitement de chaque sortie, mais aussi de l'aspect stochastique des modèles qui requiert de nombreuses simulations de chaque paramétrage pour tenir compte des effets de l'aléa, on se rend bien

compte du nombre et donc du temps de simulation nécessaire pour une large exploration des comportements du modèle qui pourrait conduire à terme à une validation du modèle. Dans ces conditions, les explorations complètes, globales et systématiques sont impossibles à mettre en œuvre. Les interactions entre les différentes échelles et entre les mécanismes, la dépendance au contexte local, la multiplicité des profils des agents et de leurs trajectoires possibles, l'emploi de mécanismes stochastiques, la non-linéarité, l'imprévisibilité et les possibles bifurcations de comportements sont autant de caractéristiques des modèles multi-agents qui rendent très difficiles les évaluations de modèles ou de mécanismes associés au modèle.

Au-delà de ces difficultés récurrentes liées à l'évaluation et à l'exploration des modèles Simpop, une contrainte de taille s'oppose au ré-emploi et au développement des modèles Simpop existants. Les modèles Simpop et SIMPOP2 ont été développés grâce à la coopération entre une équipe de géographes théoriciens et une équipe (voire une seule personne) en charge du développement informatique du modèle. Lors de ces projets de longue haleine, les allers et retours entre les deux équipes se sont multipliés avec les va-et-vient entre la théorie modélisée et le développement informatique. Les codes sources des modèles se sont allongés et complexifiés et les personnes en charge du développement sont devenues des personnes ressources, référents du code implémenté. Cette dépendance a été à l'origine de l'abandon du modèle informatique SIMPOP2 lorsque la personne porteuse du code s'est désengagée du projet Simpop. Le code du modèle SIMPOP2 est peu accessible, peu commenté et donc difficilement utilisable par une autre personne que celle qui l'a développé. Les quelques tentatives ont conclu à l'impossibilité du ré-emploi du code dans sa version originale. Cependant la puissance théorique du modèle conceptuel Simpop a poussé à l'organisation de plusieurs projets pour sa récupération : le projet SIMPOP2 du stage de Claire Rocchisani (2011) avait pour but de traduire sans ambiguïté les principaux mécanismes du modèle SIMPOP2 dans un nouveau langage ; les projets SimpopLocal et SimpopNet présentés dans cette thèse ont stimulé un lourd travail de validation de certaines hypothèses fortes du modèle conceptuel Simpop ; et le projet MARIUS, dernier né de la famille des modèles Simpop, ré-adopte les codes conceptuels de SIMPOP2 pour modéliser l'évolution du système urbain de l'ex-URSS (COTTINEAU et CHAPRON, 2013).

Dans la première partie de ce chapitre, une diversité de modèles de simulation et de mécanismes capables de générer des distributions de tailles de villes fortement hiérarchisées ont été présentés. Ces modèles de simulation sont le fruit de travaux centenaires pour la recherche de l'explication de l'organisation hiérarchique des systèmes de villes. Pourtant les mécanismes et leurs origines sont toujours aussi *mystérieux*. C'est pourquoi ce travail de théorisation, de conceptualisation et de modélisation est toujours d'actualité : la modélisation reste encore un des meilleurs moyens pour expérimenter des propositions théoriques. Les modèles participent à l'effort de théorisation en canalisant la reconstruction de faits stylisés observés par la proposition de mécanismes génératifs. La simulation de ces pro-

positions et la confrontation des résultats avec les connaissances scientifiques permettent d'évaluer la pertinence des théories modélisées. Les modèles offrent des bons outils d'expérimentation car les processus à prendre en compte sont souvent trop nombreux pour que l'intuition ou l'imagination suffisent à en envisager toutes les conséquences, parfois contre-intuitives. Cet avantage semble particulièrement intéressant pour l'étude des systèmes sociaux au sein desquels de nombreuses expérimentations à *taille réelle* ou *toutes choses égales par ailleurs* ne sont absolument pas envisageables ou même possibles. En outre, l'utilité des modèles se ressent bien au-delà du travail de conceptualisation : ils sont aussi des outils importants de la communication et de la transmission des savoirs. La "*théorie de la position et de la grandeur des villes*" de J. Reynaud (1841), très proche mais pourtant antérieure à celle des lieux centraux de W. Christaller (1931) (BRETAGNOLLE, 1999, p.21), aurait-elle connu le même engouement scientifique si un modèle (graphique, géométrique, mathématique, etc.) aussi élégant l'avait accompagné ?

Le nouveau travail de modélisation entrepris pour cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche présentés dans ce chapitre. Il adopte l'approche multi-agents et plus particulièrement le concept de modélisation géographique développé pour les modèles de la famille Simpop qui semble particulièrement adapté pour étudier et simuler la dynamique des systèmes urbains. Mais pour ne pas tomber dans les mêmes écueils d'évaluation, de difficulté technique devant l'exploration massive, d'impossibilité d'appropriation des modèles Simpop existants, etc., une modification de l'approche de modélisation est nécessaire. Nous verrons dans la partie suivante que ces limitations classiques aux modèles multi-agents peuvent être surmontées grâce à la définition de principes de modélisation et à l'utilisation systématique d'outils et méthodes d'exploration adaptés. L'ensemble de ces principes, outils et méthodes forment un laboratoire virtuel de modélisation très utile à la proposition d'autres modèles de dynamiques de systèmes de villes.

2.2 La mise en place d'un laboratoire virtuel pour l'élaboration des nouveaux modèles de simulation de la dynamique des villes

2.2.1 Les défis des modèles multi-agents

Les géographes modélisant les systèmes de villes s'appuient sur l'hypothèse que les interactions micro-géographiques sont susceptibles d'engendrer des dynamiques *stylisées* aux échelles macro-géographiques, qui constituent une des caractéristiques récurrentes et universelles de ces systèmes complexes (PUMAIN, 2007). L'hétérogénéité et le grand nombre de scénarios d'implémentation possibles pour représenter les processus en jeu, la description de dynamiques principalement individu-centré, la non linéarité des interactions, la diversité des formes de relations spatiales et l'importance du contexte historique (PUMAIN, 2006; SANDERS, 2005), sont autant de raisons qui amènent les géographes à utiliser régulièrement des modèles multi-agents comme support de réflexion et d'expérimentation (SANDERS, 2007; BATTY, 2008; HEPPENSTALL, CROOKS et al., 2011). Cependant la modélisation par des systèmes multi-agents est toujours associée à une série de véritables défis.

CROOKS, CASTLE et BATTY (2008) discutent dans leur article des grands *challenges* que doivent affronter les concepteurs de modèles multi-agents. Ils définissent ainsi sept grands points critiques que les futures modélisations doivent aborder très en amont de leur projet :

1. l'objectif motivant la construction du modèle
2. l'explicitation de la part de théorie impliquée dans la conception du modèle
3. la manière dont le modèle pourrait être testé, expérimenté et répliqué
4. la manière dont le modèle pourrait être vérifié, calibré et validé
5. la manière dont les dynamiques du modèle sont représentées par les interactions des agents constitutifs du système simulé
6. la capacité opérationnelle du modèle (i.e. la possibilité de ré-emploi du modèle dans des projets dérivés)
7. les moyens pouvant être mis en place pour le partage et la dissémination du modèle

La réflexion menée pour chaque projet de modélisation autour de ces sept défis permet d'élaborer des critères de scientificité encore manquants aux modèles multi-agents. Ces

critères de scientificité s'organisent autour de deux grands axes qui préparent la critique et la réfutation du modèle : l'explicitation de tous les implicites du modèle et l'expérimentation pour la validation du modèle.

L'explicitation de tous les implicites du modèle est un exercice difficile mais nécessaire. Elle est indispensable à la diffusion du modèle, à son appropriation par la communauté scientifique pour son adoption et/ou sa critique. Cette explicitation passe d'abord par la définition de *l'objectif motivant la construction du modèle*. La définition de l'objectif du modèle permet de guider le choix du degré de développement nécessaire (la finesse de la modélisation des mécanismes, le nombre de mécanismes implémentés, etc.). De cette finesse de modélisation on peut déterminer ce qu'il est possible de déduire des résultats du modèle compte tenu des hypothèses posées. L'enjeu de modélisation doit donc être défini en amont du projet pour bien guider son évolution. Et ce guidage est essentiel. En effet, la facilité de modélisation de mécanismes à l'échelle micro-géographique qu'offrent les modèles multi-agents incite à l'accumulation de détails qui ne sont pas nécessairement utiles à la résolution du problème posé. Cependant, le choix des niveaux d'abstraction nécessaires pour la définition des mécanismes implémentés, c'est-à-dire *la manière dont les dynamiques du modèle sont représentées par les interactions des agents constitutifs du système simulé*, n'est pas facile à cibler et reste un des sept défis à affronter.

L'explication des implicites du modèle englobe aussi le travail de définition *des théories impliquées dans la conception du modèle*. En effet, les modèles sont de plus en plus utilisés pour tester, raffiner ou développer des théories. Pourtant, les implications théoriques ou les hypothèses postulées dans les modèles sont rarement explicitement exposées, ce qui contredit les standards de scientificité :

"Our concern here however is that the theoretical implications of many agent-based models remain implicit and hidden, often covered by a thick veil of *ad hoc* assumptions about structure and process as well as a veneer of software interfacing. [...] In short, the scientific standards of the past are often buried in *ad hoc* model development."

(CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008, p.418)

Le modélisateur se doit de clairement présenter l'héritage théorique à l'origine de la construction du modèle. Il doit présenter à la fois le mode de questionnement (souvent inhérent au domaine de recherche du modélisateur) utilisé, mais aussi les hypothèses posées et les postulats implicitement inclus dans le modèle en cours de développement.

Par ailleurs, ces explicitations doivent être associées au modèle quand il est présenté, transmis et/ou publié. La multiplicité des objets implémentés, des dynamiques modélisées et la complexité des systèmes simulés rendent cet exercice très difficile et le résultat écrit (dans la plupart des cas) confus. Cela soulève la question de l'évolution des pratiques de

publication des modèles (que ce soit pour leurs descriptions, leurs résultats, etc.). Ces nouvelles pratiques de publication doivent s'orienter vers une standardisation des descriptions de modèle et doivent permettre de considérer le modèle à sa juste valeur, et non pas juste comme simple générateur de résultats numériques. L'enjeu pour la communauté des modélisateurs multi-agents est tel qu'il stimule des réflexions pour de telles nouvelles pratiques de *communication, partage et dissémination scientifique du modèle*. On trouve parmi ces initiatives des solutions très variées. Par exemple, la plateforme OpenABM (www.openabm.org) rassemble toute une communauté de modélisateurs autour de modèles dont les codes sources sont entièrement mis à disposition, de tutoriels, de forums de discussion et d'informations sur l'actualité du monde des modèles multi-agents. Par ailleurs, une équipe d'écologues a mis en place un protocole de description de modèles multi-agents, le protocole ODD (*Overview, Design concept, Details*) (GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006 ; GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al., 2010). Ce protocole propose une grille descriptive qui aide les modélisateurs à expliciter les hypothèses et les choix de modélisation réalisés lors du développement du modèle présenté. Cette grille est conçue pour être suffisamment générique pour pouvoir être appliquée à tous types de modèles multi-agents et permet une standardisation de la description des modèles propice à leur comparaison.

Le deuxième grand type de défis que doivent affronter les modélisateurs de systèmes multi-agents regroupe les mises en œuvre d'expérimentations pour la validation de modèles. Si ces questions sont clairement mises en avant maintenant, c'est qu'elles ont été et restent la principale critique contre l'utilisation des modèles multi-agents. L'engouement pour les modèles multi-agents s'explique en partie par leur capacité à proposer une autre forme de modélisation que la modélisation par équations mathématiques jusqu'alors employée (SANDERS, 2007). L'approche *bottom-up* et la notion d'agent cognitif sont très difficiles à exprimer par des équations mathématiques et deviennent beaucoup plus faciles à mettre en œuvre grâce au paradigme de modélisation multi-agents. Mais la contrepartie est de taille : les outils classiquement employés pour l'exploration et la validation des modèles équationnels ne sont pas applicables aux modèles multi-agents. Aussi la question de la validation de modèles multi-agents reste épineuse. Néanmoins, les publications et les ouvrages se multiplient autour de la notion de *bonnes pratiques* de modélisation et d'évaluation de modèles.

Une première approche de modélisation a été définie pour limiter la complexité des modèles développés et ainsi favoriser leur analyse par des procédures d'exploration et d'évaluation. Le mouvement KISS (*Keep it Simple, Stupid!*), théorisé par AXELROD (1997), a pour leitmotiv le principe de parcimonie : la complexité d'un modèle multi-agents doit résider dans les résultats issus de sa simulation, non dans ses hypothèses (BANOS et SANDERS, 2012). AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER (2007, p.110) donne un résumé de cette approche : "*Rien ne sert de concevoir des modèles dont on ne pourra étudier sérieusement*

les propriétés". Cependant l'approche KISS peut provoquer une simplification à outrance de la complexité du réel. En opposition, EDMONDS et MOSS (2005) propose une toute autre approche de modélisation : l'approche KIDS (*Keep it descriptive, Stupid !*). L'enjeu de modélisation est alors de "*conserver une approche explicative et de rendre toute partie du modèle isomorphe (similaire de structure) aux phénomènes que l'on cherche à modéliser*" (AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007, p.110). Ces deux approches, KISS et KIDS sont donc deux approches en opposition pour la modélisation des systèmes complexes. Si elles s'enracinent toutes deux dans le débat sur l'évaluation des modèles multi-agents, elles se situent en amont des questions problématiques d'exploration et de validation de modèles multi-agents.

Un corpus bibliographique commence à se constituer autour des questions d'évaluation de modèles multi-agents. Deux principaux piliers de la validation sont identifiés dans cette littérature (SARGENT, 2005 ; AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007 ; BALCI, 1998) : les trois principales étapes décrites dans cette littérature peuvent être déduite du schéma du processus de modélisation de (SARGENT, 2005) :

- D'un coté, la **validation interne** assure que le modèle implémenté (le modèle informatique) est bien conforme aux hypothèses de modélisation initialement postulées. Cette vérification permet de s'assurer que le code source informatique ne présente pas d'erreurs et mais aussi que les procédures informatiques traduisent au mieux les hypothèses comportementales postulées.
- de l'autre, la **validation externe** vérifie l'adéquation comportementale entre le système simulé (les comportements du modèle simulé) et le système réel observé (les évolutions enregistrées dans les données empiriques). Cette étape permet d'évaluer dans quelle mesure le modèle de simulation est capable de rendre compte des données empiriques et des évolutions caractéristiques du système réel. Cette étape est souvent la phase de validation privilégiée car elle permet d'explorer en détail les sorties des simulations, et marque le début de l'exploitation scientifique ou appliquée du modèle. Elle nécessite au préalable une étape de calibrage du modèle, pendant laquelle est/sont identifié(s) le(s) paramétrage(s) du modèle de simulation qui produi(sen)t les sorties de simulations les plus proches des sorties attendues (en fonction de données empiriques ou de comportements ciblés).

Toutefois cette littérature sur la validation ou l'évaluation des modèles multi-agents est encore principalement tournée vers la théorie et les principes de cette validation. Très peu d'exemples concrets de méthodes, d'outils ou même d'applications de ces principes de validation sont publiés. Ce constat peut sans doute être expliqué par deux raisons principales. D'une part, les compétences techniques nécessaires pour mobiliser les possibles outils de validations de modèles multi-agents pourraient être un facteur limitant de leur

création et de leur utilisation. La mise en œuvre d'un projet interdisciplinaire est nécessaire (comme nous le verrons dans la suite, section 2.2.3), mais son coût (temps, financement, disponibilité, etc.) peut expliquer la rareté de ce type d'outils. D'autre part, le peu d'outils de validation disponibles peut s'expliquer par le problème contextuel de l'évaluation. L'évaluation/validation d'un modèle dépend de la nature et de l'enjeu d'un modèle, aussi il est très difficile de donner une acception générale de l'évaluation et de son rôle dans la modélisation. AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER (2007) proposent une réflexion sur l'évaluation de modèles multi-agents, et présentent un ensemble de critères qui peuvent être pris en compte dans les décisions sur la validation des modèles. Parmi ces critères, on trouve : l'utilité du modèle (les résultats qu'il a produit), sa fécondité (la sérendipité que ces résultats ont pu provoquer) ou encore sa stabilité (le fait que le modèle ne soit pas sensible aux facteurs secondaires, qui ne concernent pas directement les hypothèses importantes, mais qu'il soit sensible aux facteurs primaires). Mais ces critères d'évaluation ne suffisent pas et le besoin de méthodes et d'outils (techniques) est prégnant :

"Aussi pertinents qu'ils soient, ces critères ont encore besoin, pour devenir opérationnels, d'être associés à des méthodes d'évaluation (en particulier techniques) éprouvées. Considérant que la simulation au sens large est assez récente, il n'est guère étonnant que la validation de simulation multi-agents, qui en est une des plus jeunes émanations, ne propose pas encore d'outils fiables et utilisés par tous."

(AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007, p.120)

Des propositions de solutions techniques commencent tout juste à être publiées. NGO et SEE (2011) décrivent pas à pas les solutions techniques pour la mise en œuvre d'un protocole de validation en quatre étapes. Ce protocole technique est appliqué à un modèle d'affectation agricole des sols. Les quatre étapes sont successives (c.f. 2.5). La première consiste en une évaluation qualitative et visuelle des comportements du modèle. Cette procédure est couramment nommée *face validity*³. Elle est appliquée durant le développement du modèle pour donner au modélisateur une première estimation des effets des mécanismes implémentés. La deuxième étape consiste à réaliser une analyse de sensibilité. Elle permet d'examiner les effets des valeurs des paramètres et ainsi de déterminer ceux qui ont le plus d'influence sur les sorties de simulation. Elle permet de la sorte de neutraliser ou éliminer certains paramètres du modèle finalement peu significatifs et préparer à la troisième étape, le calibrage du modèle. Pour cette étape, ils proposent d'utiliser des algorithmes génétiques. Les algorithmes génétiques sont des heuristiques qui explorent un espace de recherche en suivant des stratégies souvent inspirées des processus naturels et dans le but de résoudre un problème d'optimisation pour lesquels ils cherchent

3. Selon un des principes fondateurs de la VV&T - *Verification Validation and Testing*- (BALCI, 1998)

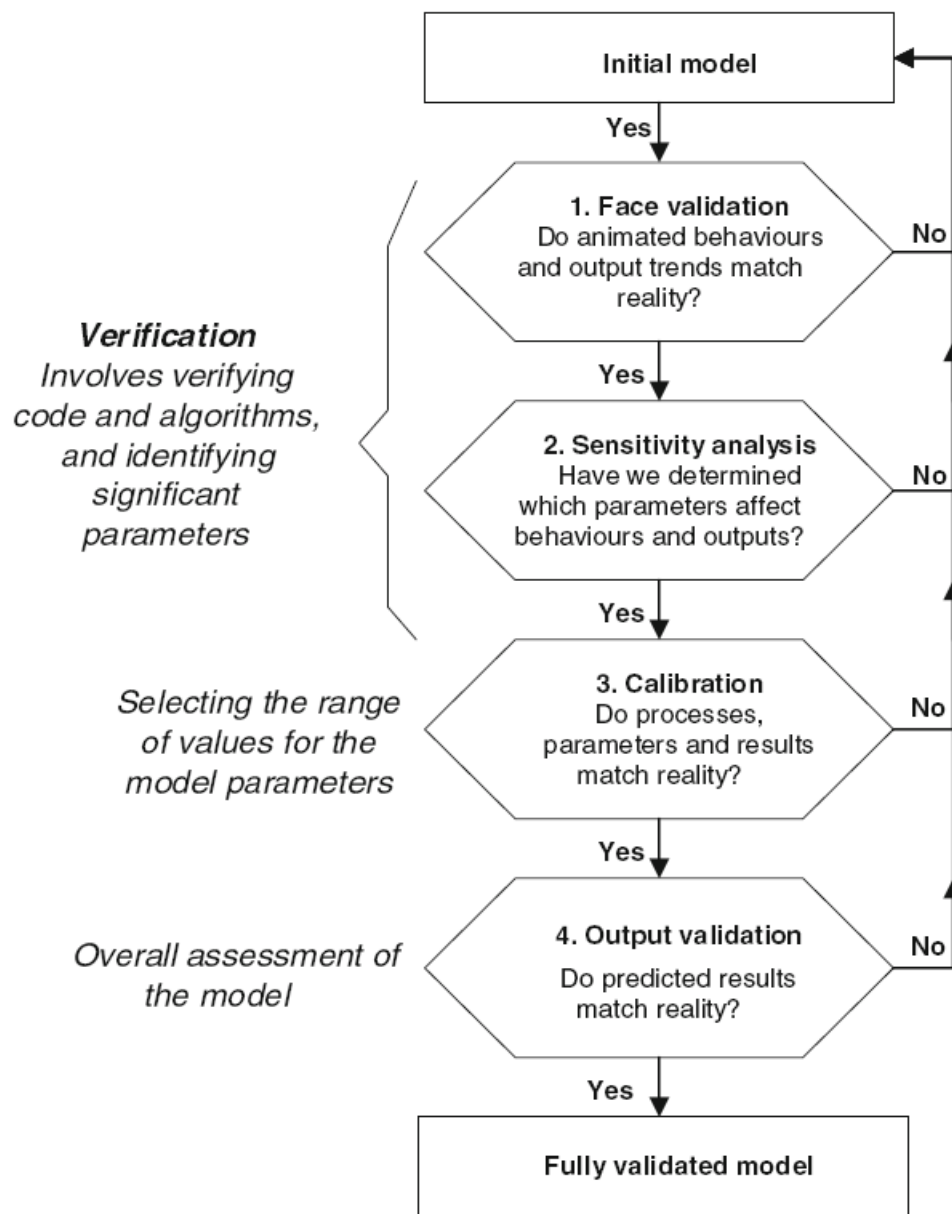


Figure 2.5 – Protocole de validation de modèle multi-agents proposé par NGO et SEE (2011)

des solutions optimales. Ces solutions optimales correspondent ici aux paramétrages (un paramétrage est l'ensemble des valeurs prises par les paramètres d'un modèle au cours d'une simulation donnée) qui génèrent des sorties de simulations les plus proches des données empiriques. La dernière étape correspond à une étape de validation des sorties de simulations. Elle évalue la capacité prédictive du modèle et se fonde sur une comparaison avec les données empiriques. La publication de ce protocole de validation d'un modèle multi-agents est une démarche innovante : c'est un des premiers articles en sciences sociales qui décrit à la fois une méthodologie de validation complète et son application à un modèle multi-agents. Ce protocole de validation est présenté comme étant applicable à tous les modèles multi-agents, pourtant cette application n'est pas si facilement généralisable. D'abord le protocole est centré sur les données empiriques, or ces données ne sont pas toujours disponibles ou utilisables. De nombreux modèles multi-agents sont d'ailleurs conçus pour combler ce manque et offrir des supports de réflexion lorsque le terrain, les enquêtes ou les systèmes étudiés ne peuvent en fournir. Les solutions techniques de ce protocole de validation proposé doivent donc être adaptées pour toute cette gamme de modèles. D'autre part, les techniques employées ne sont pas à la portée de tous les chercheurs car elles nécessitent la mise en œuvre d'une forte collaboration inter-disciplinaire. Les plans d'expériences et le traitement des résultats des analyses de sensibilité reposent sur une science complexe des statistiques et les algorithmes génétiques requièrent des connaissances solides en programmation. Toutefois, ce protocole technique est une très bonne première proposition qui montre la voie d'un domaine de recherche porteur :

"It should be noted that this represents only one view of the calibration and validation process based on experience gained through building an ABM of shifting cultivation. There are clearly a range of methods available that could be used in or adapted to any part of the calibration and validation process, e.g. different methods of parameters optimization, different measures of evaluating performance, etc. Until more guidance is provided in the literature, calibration and validation will remain a key challenge."

(NGO et SEE, 2011, p.195)

Pour continuer dans la même voie et chercher à dépasser les grands défis de la modélisation multi-agents, nous avons travaillé à définir une nouvelle démarche de modélisation et d'évaluation. Ce travail de définition est fondé sur la longue expérience de modélisation du laboratoire, sur les différentes utilisations de systèmes multi-agents que ses membres ont pu faire depuis ces deux dernières décennies, mais également sur les multiples interactions suscitées par la participation à de nombreux projets de recherche interdisciplinaires (ERC GeoDiverCity, ANR TransMondyn, Les rencontres de Rochebrune,...)

2.2.2 Vers une démarche de modélisation itérative et assistée par le calcul intensif

Historiquement, les outils de développement de modèles multi-agents n'étaient pas aussi accessibles pour les néophytes que peut maintenant l'être la plateforme de modélisation NetLogo⁴ par exemple. Les géographes (ou autre spécialistes en science sociales) qui voulaient développer un modèle multi-agents mais qui n'avaient pas la pratique informatique nécessaire devaient donc s'associer à des collègues informaticiens pour débiter leur projet de modélisation. Les géographes de l'équipe P.A.R.I.S. de l'UMR Géographie-Cités ont donc collaboré avec des informaticiens du laboratoire d'informatique LAFORIA pour développer le premier modèle Simpop (BURA et al., 1996). Ils ont ensuite accueillis plusieurs thèses (GLISSE (2007), LOUAIL (2010)) et collaboré avec d'autres laboratoires tels que le LIP6 pour développer les modèles SIMPOP2 Europe, États-Unis et Afrique du Sud. La méthode de développement suivie était donc une méthode en deux étapes : le développement conceptuel du modèle complet par une première équipe précédait son développement informatique par une deuxième équipe. Les règles du modèle, qui reflétaient les faits stylisés géographiques sélectionnés pour le modèle, étaient d'abord définies par les géographes puis explicitées aux développeurs qui les implémentaient ensuite dans le modèle informatique. Cette méthode de modélisation a conduit à la réalisation de modèles très instructifs et largement valorisés, mais elle a été décevante sur plusieurs points. Elle implique de nombreux allers et retours entre les deux équipes qui, en cas de manque de discussion, peut conduire à au moins trois grands inconvénients :

- D'abord, des divergences entre les règles du modèle conceptuel et les mécanismes effectivement implémentés dans le modèle informatique peuvent être très facilement engendrées par cette méthode. Elles sont souvent induites par une mauvaise explicitation de tous les implicites supposés par chaque équipe.
- Le grand nombre d'allers-retours entre les deux équipes démultiplie les temps de développement du modèle.
- Ces deux inconvénients ont des conséquences sur la valorisation du modèle. D'abord, comme nous l'avons expliqué dans la section 2.1.6, la dépendance aux développeurs peut limiter les utilisations du modèle et mais aussi la pérennité des futurs développements. D'autre part, la séparation thématique des deux équipes peut provoquer des publications qui incluent des explicitations ou des descriptions de mécanismes internes insuffisantes pour la reproductibilité des expériences. De plus, les temps de développement déjà très grands limitent le temps consacré aux expériences, aussi

4. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

de nombreux modèles multi-agents sont publiés sans qu'aucune référence à leur évaluation ne soit mentionnée.

Le deuxième processus de modélisation couramment employé pourrait s'apparenter à un processus multi-étapes et cumulatif. Dans ces cas, la conception théorique et l'implémentation informatique sont généralement réalisées par la/les même(s) personne(s). C'est une démarche de modélisation itérative et incrémentale au cours de laquelle le modélisateur conçoit, propose, et compare différents hypothèses et mécanismes. Pour ce faire, il segmente le développement du modèle par petites étapes d'incrémentation. Chaque étape peut correspondre à l'implémentation d'un nouveau mécanisme ou d'une nouvelle version d'un mécanisme. À la fin de chaque étape, le modélisateur réalise une évaluation qualitative des performances du modèle. Cette évaluation permet de tester l'effet des mécanismes implémentés les uns après les autres et de sélectionner le cas échéant les mécanismes à conserver ou au contraire à laisser de côté. Ces évaluations se font par la simulation du modèle et l'appréciation des sorties de simulations au regard des enjeux et objectifs du modèle, qui se traduisent souvent par des comportements que le modèle doit exhiber. C'est une étape de *face validity*. Cependant elle nécessite un calibrage approximatif du modèle pour tester sa capacité à reproduire des "comportements attendus cohérents". En effet, pour permettre une bonne appréciation des effets du mécanisme testé, et notamment savoir si les mécanismes implémentés peuvent être à l'origine d'un comportement de modèle recherché ou intéressant, encore faut-il trouver le domaine de paramétrage qui le permette. Or, avec l'ajout successif de mécanismes, leur non-linéarité, leur combinaison et la complexification du modèle, c'est-à-dire l'élargissement de l'espace de paramétrage, ce domaine de calibrage peut être de plus en plus difficile à localiser. Avec le cumul de mécanismes et la complexification des modèles, l'évaluation des effets non-linéaires des mécanismes et de leur combinaison devient un travail de plus en plus difficile pour le modélisateur.

Avec l'équipe de modélisation du programme de recherche GeoDiverCity, nous avons focalisé notre réflexion sur l'automatisation de cette approche d'évaluation de modèle. L'enjeu était de faciliter le calibrage et le processus d'évaluation de chaque nouvel incrément du modèle en remplaçant les étapes de *face validity* par des procédures d'exploration et d'évaluation automatisées de l'espace de paramétrage. L'exploration automatisée de cet espace nécessite de nombreuses simulations du modèle, à la fois pour tester de nombreux paramétrages mais aussi pour tester l'effet de l'aléa sur les sorties de simulation du fait de la stochasticité des mécanismes implémentés. Cette exploration automatisée exige donc une grande puissance de calcul. Nous avons choisi d'orienter les procédures d'exploration automatisée que nous développons vers l'optimisation des recherches dans l'espace de paramétrage du modèle et l'optimisation des temps de calcul nécessaires, c'est-à-dire vers la conception d'outils pour une exploration *efficace* des comportements du modèle. Ces

dépenses en temps de calcul sont par ailleurs compensées par la fiabilité des résultats obtenus. Alors que la *face validity* ne donnait qu'une idée des comportements possibles du modèle, les méthodes d'exploration que nous développons permettent d'affirmer et de prouver certains résultats. Cette nouvelle approche de modélisation, qui a vu le jour avec la conception des modèles présentés dans cette thèse, est toujours en cours de développement. Nous présentons dans le chapitre 4 les premiers résultats très prometteurs qu'elle a permis d'obtenir.

Cette nouvelle approche de modélisation assistée par ordinateur (calcul intensif), repose sur la définition de critères quantitatifs d'évaluation du modèle à explorer qui reflètent les enjeux du calibrage du modèle. Cette définition de critères quantitatifs n'est pas évidente, surtout dans le contexte de la modélisation d'un système complexe. Il peut en effet exister une infinité de points de vue pour observer un tel système et donc une multitude de moyens pour chiffrer un indicateur de l'état de ce système. Le choix du/des indicateur(s) d'observation doit donc être adapté à la finesse et aux objectifs de son calibrage, c'est-à-dire à l'enjeu de modélisation à l'origine de la conception du modèle. Les critères d'évaluation quantitatifs permettent ensuite de noter la capacité d'un paramétrage à refléter les critères du calibrage du modèle, c'est-à-dire sa capacité à engendrer un comportement recherché, le comportement de calibrage. À ce choix d'indicateurs s'ajoute le problème de la prise en compte de la stochasticité souvent présente dans les modèles multi-agents. Avec le jeu de l'aléa, la simulation d'un même paramétrage du modèle peut conduire à des sorties de simulation très variées. Pourtant il est nécessaire de résumer cette variabilité pour estimer les effets probables du paramétrage à évaluer. Il est rare que la distribution des valeurs prises par un indicateur mesuré sur chacune des simulations indépendantes d'un même paramétrage (appelées *réplications*) suive une distribution de type loi Normale. Les résumés de distribution couramment utilisés comme les moyennes et les écart-types ne sont donc pas applicables dans ces conditions. Il devient nécessaire de trouver d'autres truchements, tels que des seuils ou des intervalles de confiance, pour résumer la distribution constatée.

Après l'explicitation et la quantification de ces critères d'évaluation, les procédures d'exploration automatisée assistent le modélisateur dans les étapes d'évaluation du modèle. Ces procédures reposent à la fois sur des plans d'expérimentation connus et bien définis et des plans d'expérimentation innovants. Elles permettent de scanner efficacement l'espace de paramétrage pour identifier les domaines de valeurs produisant les comportements de simulation les plus proches des comportements attendus ou pour cartographier l'espace de paramétrage en fonction des comportements possibles du modèle et des objectifs de modélisation et de calibrage. Nous avons proposé et testé pour cette thèse deux outils d'exploration de modèle : un protocole de calibrage automatique de modèles multi-agents, présenté et appliqué dans la section 4.1, et un protocole d'analyse de sensibilité innovant, présenté et appliqué dans la section 4.3.

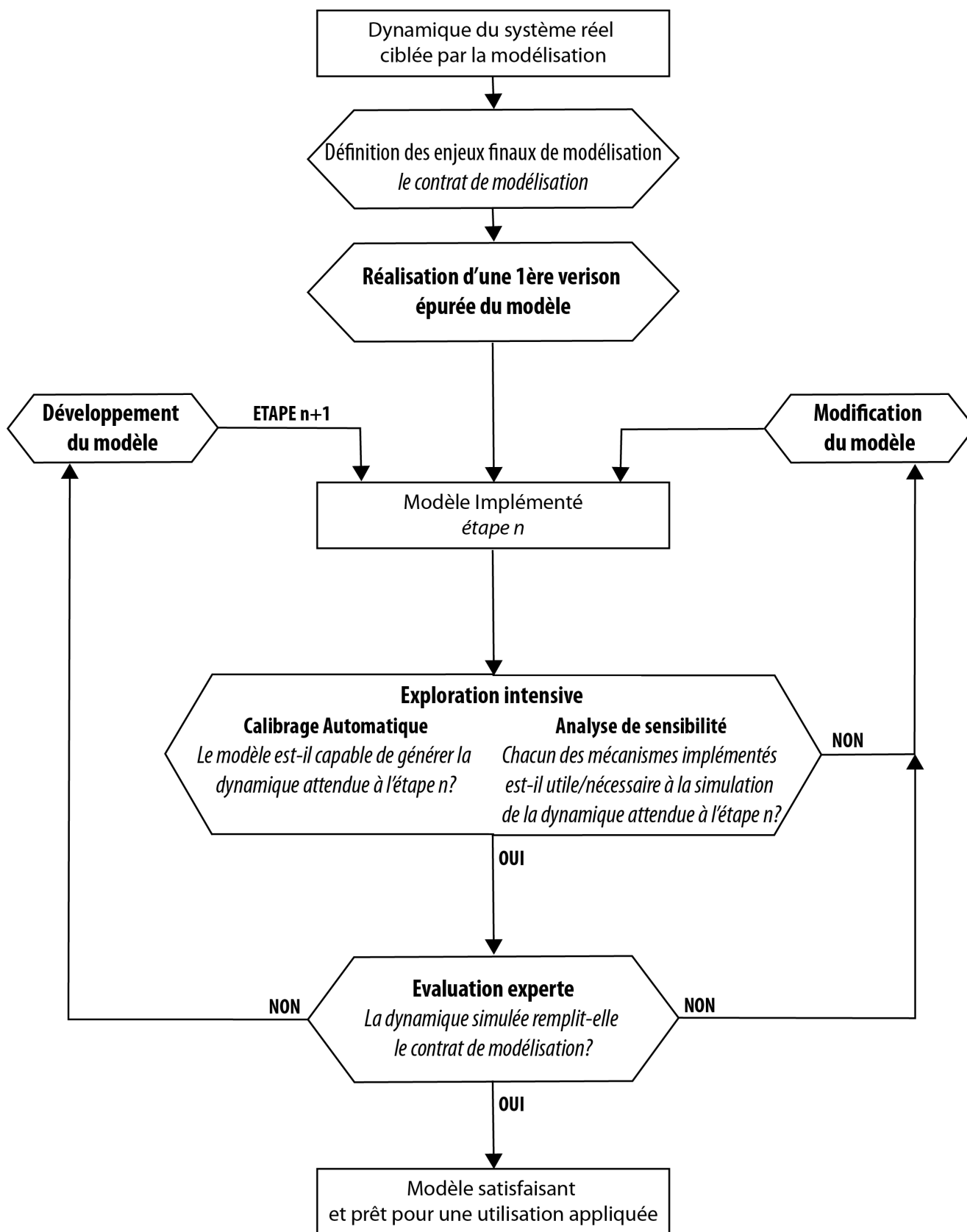


Figure 2.6 – Une nouvelle démarche de modélisation et d'évaluation de modèles multi-agents

L'enjeu initial du développement de la démarche de modélisation automatisée est de faciliter les procédures de calibrage, d'évaluation et à terme de validation du modèle. Le meilleur moyen de mettre en œuvre cette méthode de modélisation est de procéder de façon itérative dans le développement du modèle. Une schématisation de cette démarche est proposée sur la figure 2.6. La démarche doit débiter avec une première version du modèle extrêmement épurée. Un premier calibrage et une première évaluation des comportements ainsi générés permettent d'apprécier la capacité du modèle à générer les comportements attendus (ou pour lesquels il est construit). Ces premiers résultats permettent ensuite de guider le développement du modèle. L'objectif est de procéder par petits ajouts successifs dans le modèle et de tester les effets sur les sorties de simulation de ces ajouts itératifs. Cette modélisation pas-à-pas permet d'évaluer chaque version du modèle et de contrôler la complexification croissante du modèle avec l'ajout de mécanisme. Cette démarche de modélisation s'apparente ainsi à la démarche KISS. Elle est cependant fortifiée par son couplage avec des outils d'exploration et d'évaluation adaptés.

2.2.3 Un véritable laboratoire virtuel développé par une équipe inter-disciplinaire

"Considérant que la simulation au sens large est assez récente, il n'est guère étonnant que la validation de simulation multi-agents, qui en est une des plus jeunes émanations, ne propose pas encore d'outils fiables et utilisés par tous. Néanmoins la structuration autour d'équipes à compétences multiples, mobilisant tout à la fois informaticiens, statisticiens et thématiciens, commence à produire ou à adapter des outils pour l'étude des systèmes complexes que sont les simulations multi-agents."

(AMBLARD et PHAN, 2006, p.120)

La conception et la mise en place d'une méthodologie de développement et d'évaluation de modèle telle que nous l'avons présentée dans la section précédente est un travail qui n'est réalisable pour une première fois que par une équipe inter-disciplinaire. Ce travail requiert en effet des connaissances pointues dans deux ou trois domaines au moins : en informatique et en statistique pour l'élaboration des plans d'expérimentation, en géographie pour la validité thématique par exemple. Cette démarche a d'abord été développée pour le modèle SimpopLocal grâce à une collaboration très étroite entre thématiciens géographes et informaticiens au sein de l'équipe formée par Sébastien Rey Coyrehourcq, Romain Reuillon et moi-même.

Tout a commencé avec une première version du modèle SimpopLocal qui avait été développée en un peu moins d'un an avec l'aide de Sébastien Rey Coyrehourcq, Arnaud Banos et Denise Pumain. Ce premier modèle, développé en NetLogo, exhibait déjà quelques

comportements très intéressants. Pourtant nous butions sur un problème de taille : son calibrage. Nous n'arrivions pas à trouver les valeurs de paramétrage qui permettaient de générer le comportement particulier pour lequel le modèle avait été construit. Chaque simulation du modèle durait plus de 2 minutes et malgré de nombreuses simulations, le tâtonnement par essai-erreur ne donnait pas de résultats probants. Aussi, nous ne savions pas si les mécanismes implémentés étaient bien capables de produire les comportements recherchés ou si nous devions encore continuer à développer le modèle.

C'est durant cette phase de tâtonnement que nous avons rencontré Romain Reuillon et Mathieu Leclaire. Ils avaient développé depuis 2008 le logiciel OpenMOLE (REUILLON, CHUFFART et al., 2010 ; REUILLON, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ, 2013) qui allait révolutionner notre façon d'explorer les modèles multi-agents. Ce logiciel a pour ancêtre le logiciel SimExplorer (AMBLARD, 2003 ; DEFFUANT et al., 2003). SimExplorer a été conçu pour répondre au besoin nouveau d'exploration massive de modèles multi-agents pour lesquels l'exploration par la simulation est généralement l'unique moyen de connaître les comportements du modèle. Il offre à l'utilisateur une interface ergonomique pour la conception de plans d'expérimentation et donne accès au calcul distribué :

"There is actually a need to automate both the run of a huge number of simulation experiments and to manage the corresponding experimental designs, i.e. the organisation of the simulation experiments, in a more evolved and valuable fashion than a simple batch process implementation. The previous concern includes both an ergonomic interface for the specification of the experimental designs and the distribution of computations to launch the corresponding simulation experiments on parallel machines when possible."

(AMBLARD, 2003, p.1)

Cependant, même si le calcul distribué avait été identifié dès le départ comme un aspect essentiel pour permettre l'exploration de modèles, il n'avait pas été intégré dans le formalisme informatique proposé par SimExplorer. De plus SimExplorer était un prototype qui n'avait été éprouvé que sur un faible nombre d'applications. La conception d'OpenMOLE s'est ainsi appuyée sur les réussites et les échecs de SimExplorer. Un nouveau formalisme de description des expérimentations numériques a été conçu en intégrant dès le départ le calcul distribué à grande échelle. Le développement d'OpenMOLE s'est fait au sein de l'Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de-France (ISC-PIF), et s'est fondé sur un large panel de cas d'utilisation provenant de nombreux champs disciplinaires. Cette approche *bottom-up* associée à un effort permanent de généralité a permis d'aboutir en quelques années à une plateforme générique, pragmatique et éprouvée pour l'exploration de modèles de systèmes complexes sous forme d'un langage dédié, textuel et graphique (c.f. figure 2.7), exposant des blocs cohérents et au bon niveau d'abstraction

pour la conception d'expérimentations numériques distribuées sur des modèles de simulation. Les procédures (ou *workflow*) proposées dans OpenMOLE sont décrites de manière indépendante des modèles et sont donc reproductibles, ré-utilisables et échangeables entre modélisateurs.

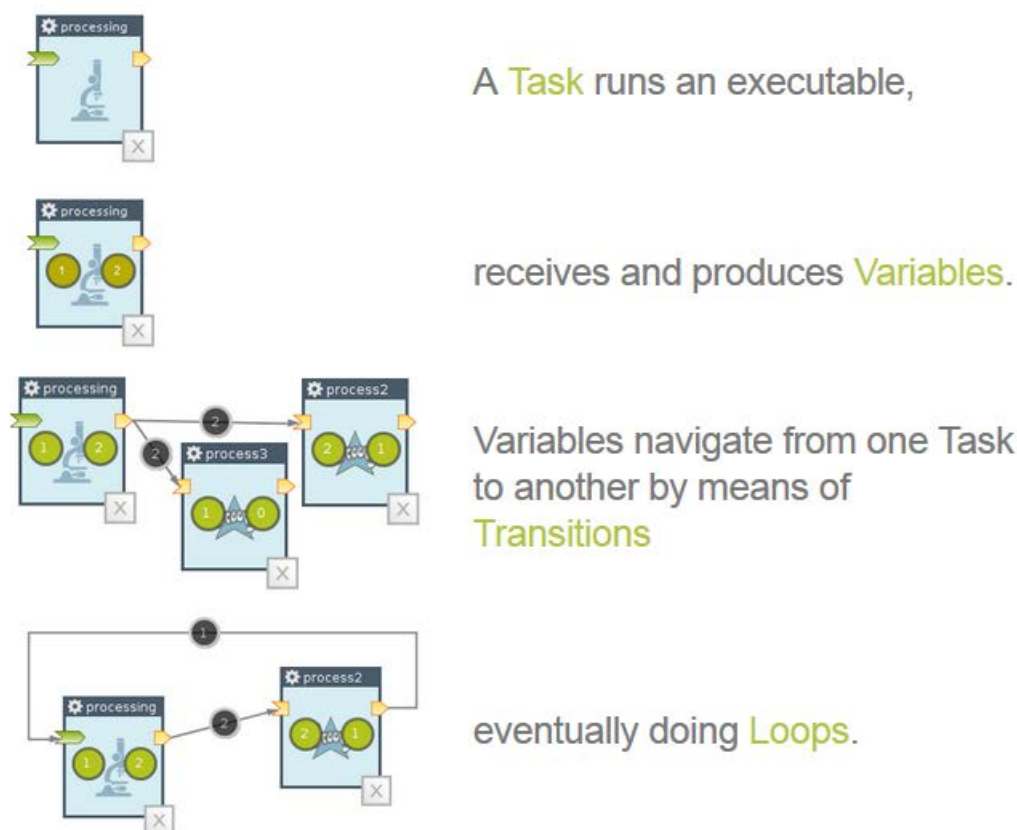


Figure 2.7 – Le formalisme graphique de OpenMOLE, d'après M. Leclaire et R. Reuillon

La rencontre entre les problèmes de SimpopLocal (calibrage et temps de simulation) et les solutions que pouvait apporter OpenMOLE (calcul distribué et plans d'expérimentation adaptés) a conduit à des développements théoriques et méthodologiques importants dont la production d'outils d'exploration adaptés aux spécificités des modèles multi-agents. D'un côté, OpenMOLE incorpore maintenant de nouvelles procédures d'exploration génériques et ré-utilisables telles que des méthodes de traitement des données, des méthodes d'optimisation (algorithmes évolutionnaires), des analyses de sensibilité, etc. De l'autre, une méthodologie nouvelle de modélisation et d'exploration de modèles multi-agents a vu le jour. L'association de ces nouveaux outils d'exploration et de cette nouvelle méthode de modélisation propose une nouvelle approche du laboratoire virtuel, incarnée par la plateforme de modélisation SimProcess, objet de la thèse de Sébastien Rey Coyrehourcq.

Dans leur livre fondateur pour l'utilisation des systèmes multi-agents en sciences sociales, EPSTEIN et AXTELL (1996) ont développé le concept de la *generative social science*. Ce concept envisage chaque modèle multi-agents élaboré comme une société artificielle. Et chaque société artificielle s'apparente à un laboratoire virtuel qui permet d'étudier la génération de comportements macroscopiques à partir d'hypothèses émises sur les comportements microscopiques :

"[...] we shall refer to agent-based models of social processes as *artificial societies*. In this approach fundamental social structures and groups behavior emerge from the interaction of individuals operating in artificial environments under rules that place only bounded demands on each agent's information and computational capacity. We view artificial societies as *laboratories*, where we attempt to "grow" certain social structures in the computer - or *in silico* - the aim being to *generate* the macroscopic social structures and collective behaviors of interest."

(EPSTEIN et AXTELL, 1996, p.4)

Nous proposons de reprendre et d'élargir ici la notion de laboratoire virtuel. Le laboratoire virtuel n'est plus seulement le modèle de simulation et les hypothèses qu'il simule (i.e. l'*artificial society*). Il contient aussi les méthodes, les outils et procédures de modélisation adaptés à la conception et à l'exploration du modèle et dont la pratique procure autant de connaissances et de retours théoriques que la conception du modèle lui-même. Ce laboratoire virtuel s'apparente donc d'autant plus à un véritable laboratoire de recherche avec une paillasse (le modèle à concevoir et explorer), les hypothèses d'un chercheur (les mécanismes du modèles), des méthodes (la méthode de modélisation itérative et assistée par le calcul intensif), des outils (les procédures d'exploration automatisées et tout autre plan d'expérimentations incorporé dans OpenMOLE), le tout rassemblé dans une salle, la plateforme de modélisation SimProcess (REY COYREHOURCQ, 2014). Ce laboratoire assure la répliquabilité de chaque expérience, mais aussi le développement, la standardisation, le partage et la dissémination des outils et des méthodes de modélisation.

Cette plateforme est un outil de modélisation collaboratif en perpétuelle évolution grâce à l'ajout constant de procédures, d'expérimentations et de modèles. Elle est développée pour être la plus ouverte possible : les outils et les méthodes qu'elle propose sont conçus dans un souci de généricité qui favorisera leur application à de multiples modèles. Son développement dépasse maintenant les temporalités des deux thèses (celle de S. Rey Courehourcq et celle-ci), et constitue un des projets de recherche de l'ERC GeoDiverCity. De nouvelles méthodologies de modélisation sont en cours de développement grâce à la collaboration d'une équipe agrandie qui regroupe encore plus de géographes et d'informaticiens (Arnaud Banos, Paul Chapron, Clémentine Cottineau, Matthieu Leclaire, Denise Pumain, Romain Reuillon, Sébastien Rey Coyrehourcq et moi-même).

2.2.4 Deux modèles de hiérarchisation de système de peuplement

2.2.4.1 Un cadre théorique

La démarche de modélisation qui vient d'être présentée s'est développée peu à peu et a finalement conduit à l'élaboration d'un véritable laboratoire virtuel, du nom de SimProcess. Les outils et les méthodes de modélisation qu'il renferme ont été conceptualisés et développés lors de l'élaboration des deux modèles : SimpopLocal et SimpopNet. Ces deux modèles ont été développés dans le but d'apporter de nouveaux éléments de réflexion à la problématique de la simulation de la dynamique des systèmes de peuplement. Comme les modèles présentés dans la première partie de ce chapitre, les deux nouveaux modèles s'attaquent à la modélisation des processus de hiérarchisation des systèmes urbains. Dans la lignée des modèles Simpop, ils utilisent comme cadre théorique la théorie évolutive urbaine (PUMAIN, PAULUS et VACCHIANI-MARCUZZO, 2009b) présentée dans la section 1.5.2.

Conformément à la théorie évolutive urbaine, l'évolution des systèmes urbains est engendrée par les interactions interurbaines. Plus précisément, la dynamique de croissance de chaque point de peuplement est contrôlée par la capacité de ce point à générer des interactions avec les autres éléments du système de peuplement. Le cadre de modélisation des simulations multi-agents facilite l'utilisation de ces processus d'interactions spatiales parce qu'il favorise l'inclusion de mécanismes d'interactions explicités à l'échelle des points de peuplement (BRETAGNOLLE, DAUDET et PUMAIN, 2006 ; PUMAIN et SANDERS, 2013). Les modèles Simpop sont issus de l'application de ces concepts théoriques. Dans ces modèles, la structure macro-géographique recherchée (la distribution hiérarchisée des points de peuplement) émerge de la différenciation des dynamiques de croissance individuelles, elles-mêmes induites par les capacités hétérogènes d'interaction au sein du système. Le schéma de la figure 2.8 résume les principes de modélisation de l'approche théorique Simpop par rapport aux principes de modélisation utilisés par les modèles de croissance aléatoire (c.f. section 2.1.2). Dans ces modèles aléatoires, comme les modèles fondés sur l'effet proportionnel de Gibrat ou le processus d'attachement préférentiel, la distribution de la croissance à l'origine de la hiérarchisation du système de peuplement est entièrement due au hasard. Dans les modèles Simpop, cette distribution de la croissance est induite par le comportement des entités constitutives du système, les points de peuplement. Tout l'enjeu des modèles Simpop est justement d'explicitier ces comportements d'interactions spatiales.

L'explicitation des comportements d'interactions spatiales se fonde sur les connaissances théoriques à l'origine de la théorie évolutive des systèmes de peuplement et notamment sur les grands faits stylisés des systèmes urbains qui ont été présentés dans la section

1.5. Dans ce premier chapitre, deux régimes de dynamique de système de peuplement ont été mis en évidence : un régime de dynamique à croissance fortement contrainte par les conditions locales et un régime de dynamique à croissance rapide et libérée des contraintes locales (c.f. section 1.4.2). Ces deux régimes de croissance présentent des caractéristiques bien distinctes qui justifient l'élaboration de deux modèles différents. Le premier régime est simulé par le modèle *SimpopLocal*, qui fait l'objet de deux chapitres de cette thèse, les chapitres 3 et 4. Le deuxième régime est simulé par le modèle *SimpopNet* présenté dans le chapitre 5. Ces deux modèles sont représentatifs de fonctionnements en système différents, mais sont de formes très liées car ils participent de la même théorie.

Ces deux modèles ont été conçus en suivant la méthode de modélisation itérative et assistée par le calcul intensif grâce aux outils de la plateforme *SimProcess*. Ils ont été conçus dans un souci de parcimonie fort et peuvent être envisagés comme des premières versions de modèles plus complexes. Le nombre de mécanismes et de règles de simulation est limité. L'enjeu de modélisation n'est pas de reproduire une dynamique totalement représentative de l'évolution des systèmes de peuplement, mais plutôt d'identifier les processus élémentaires à l'origine de ces dynamiques. Ils ne retracent pas le fonctionnement quotidien des systèmes de peuplement mais sont conçus pour représenter l'évolution stylisée du système de peuplement : seuls les processus qui engendrent des transformations visibles à l'échelle du système sont considérés comme constitutifs. Ces deux modèles sont donc des outils intellectuels pour une réflexion sur les mécanismes élémentaires et essentiels de la croissance urbaine. Le tâtonnement théorique à l'origine de leur élaboration a pour but de répondre aux questions suivantes : La théorie évolutive urbaine peut-elle engendrer, si elle est simulée, des évolutions de systèmes urbains caractéristiques ? Quels sont les mécanismes, suggérés par la théorie évolutive urbaine, essentiels à l'émergence des structures caractéristiques des systèmes urbains ? Ces deux modèles permettent donc de poser un cadre de réflexion théorique autour de la théorie évolutive urbaine. Ce sont de modèles expérimentaux, conçus comme des propositions de modélisation d'un processus géographique. Mais leur évaluation, rendue possible par la méthode de modélisation présentée dans ce chapitre, autorise ensuite leur incorporation au sein de modèles toujours plus complexes. Elle permet de donner un cadre pour leur utilisation ou d'orienter les incrémentations possibles pour d'autres utilisations.

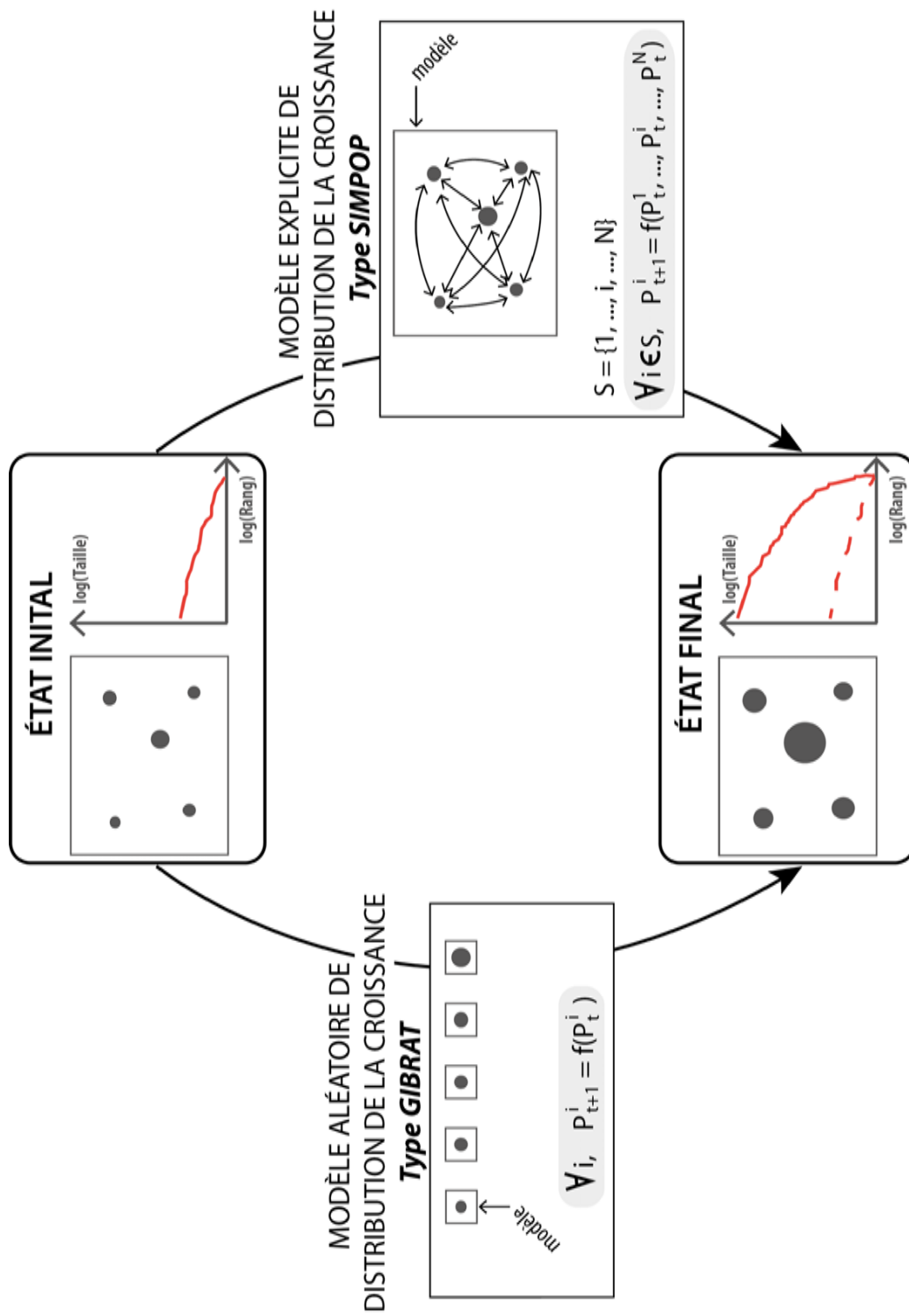


Figure 2.8 – Deux principes de modélisation pour la simulation de la distribution de la croissance au sein d'un système de peuplement

2.2.4.2 Un cadre descriptif

Les chapitres suivants de cette thèse sont consacrés à la description et à l'expérimentation des deux modèles SimpopLocal et SimpopNet. Un même cadre descriptif a été suivi pour présenter ces modèles et les expérimentations dont ils ont été l'objet. Ce cadre s'inspire du cadre de description de modèle proposé par le protocole ODD (*Overview, Design concept, Details*) (GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006 ; GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al., 2010). Cependant la redondance de la description et l'inapplicabilité de certains concepts ODD aux modèles Simpop rendraient très difficile la lecture d'une description des modèles SimpopLocal et SimpopNet qui suivrait absolument ce protocole. La souplesse rédactionnelle de la thèse permet de proposer un autre cadre descriptif qui englobe le protocole ODD pour le rendre encore plus complet et précis.

Dans un souci de reproductibilité des modèles et des expérimentations, tous les codes sources utilisés sont mis à disposition en accès libre sur internet. Ces codes sources s'ajoutent aux descriptions des modèles et de leurs applications. Les descriptions littéraires et schématiques des modèles et de leurs applications permettent au contraire de lever les ambiguïtés possibles sur les choix de modélisation et de méthodologie qui ne sont pas explicites dans le code, et bien sûr d'introduire le lecteur ou futur utilisateur aux modèles. Cette explicitation du code, des choix de modélisation mais aussi des concepts théoriques a pour enjeu de préparer et faciliter l'accessibilité, la diffusion et la communication sur les modèles et leurs résultats. Les descriptions des modèles SimpoLocal et SimpopNet se présentent suivant le déroulement suivant :

La définition d'une problématique sujette à modélisation. Chaque description du modèle est introduite par la question de recherche qui a mené à la conception du modèle. Cette première étape introduit donc le problème à explorer par la modélisation.

Une mise en contexte scientifique de l'étude. Cette deuxième étape résume les travaux de recherche déjà réalisés sur la question de modélisation posée. Elle comprend deux grands types de mise en contexte scientifique qui peuvent toutefois se confondre. D'un côté, un état de l'art général et inter-disciplinaire permet de rassembler les connaissances scientifiques thématiques relatives à la question de modélisation. D'un autre, un état de l'art spécifique à la modélisation rassemble toutes les formes de modélisation déjà entreprises, même en partie, sur cette même question de modélisation. Cette étape permet de constituer la *modélographie* de la thématique étudiée, c'est-à-dire un état des lieux des connaissances, des modèles et de leurs résultats en relation avec la question de recherche posée. La constitution d'une modélographie permet de cadrer les besoins et de cibler les bonnes sources d'inspiration pour un nouveau modèle.

La proposition d'un modèle pour répondre à la problématique soulevée. La description interne du nouveau modèle proposé se doit d'être la plus claire possible. Pour

ce faire le protocole descriptif ODD est un outil efficace GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al. (2010).

Mais le déroulement descriptif proposé n'est pas entièrement adapté à la description des deux modèles SimpopLocal et SimpopNet. En effet le protocole ODD et notamment la section consacrée à la description interne du modèle (Process overview and scheduling) a été conçue pour être applicable à des modèles simulant l'évolution d'agents cognitifs. Les agents des modèles SimpopLocal et SimpopNet ne présentant pas ces caractéristiques, certaines sections sont inappropriées. Nous proposons donc de suivre au mieux le protocole ODD mais il paraît cependant essentiel pour la compréhension du modèle mais aussi pour l'exhaustivité de sa description de perturber par endroit l'ordre des éléments descriptifs, d'ajouter certaines parties descriptives qui n'entrent pas explicitement dans le schéma du protocole ODD et d'en retirer certaines qui ne semblent pas adaptées et donc peu pertinentes pour SimpopLocal et SimpopNet. Par ailleurs d'autres points, peut-être moins mis en avant dans le protocole ODD mais pourtant essentiels à la compréhension du déroulement d'une simulation sont ajoutés. Pour rappeler au lecteur la correspondance avec le protocole ODD, les dénominations des éléments descriptifs ODD seront placées entre parenthèses dans les titres de paragraphes de description.

Une description des connaissances acquises par l'exploration du modèle.

Cette section détaille les différentes expérimentations qui ont pu être réalisées avec les modèles et les connaissances que celles-ci ont apporté. Suivant les expérimentations réalisées, les connaissances acquises sont relatives au calibrage du modèle, à son évaluation, mais aussi aux retours sur les concepts théoriques que ces résultats ont suscités. Ces expérimentations et résultats illustrent les comportements des modèles. Ils renseignent sur leur pouvoir explicatif et les conditions de leurs futurs développements ou applications.

Les deux modèles SimpopLocal et SimpopNet sont décrits suivant ce cadre descriptif commun. Cependant pour le modèle SimpopLocal, l'accent est mis sur l'exploration du modèle et son évaluation, alors que pour le modèle SimpopNet l'accent est mis sur les fondements théoriques. Les explicitations relatives aux fonctionnements internes de simulation sont décrites avec autant de précision.

Conclusion : Un cadre de modélisation pour de nouveaux modèles de simulation des dynamiques de systèmes de villes

Au cours du premier chapitre, nous avons présenté les grandes régularités frappantes dans l'organisation des systèmes de villes que nous avons résumées en 10 faits stylisés. Parmi ces 10 faits stylisés, l'un se démarque des autres par la fascination qu'il exerce sur les chercheurs : la distribution fortement asymétrique des tailles de villes au sein d'un système. Cette organisation très hiérarchisée des systèmes urbains a suscité de nombreux travaux de modélisation dont l'objectif était d'identifier les mécanismes capables d'engendrer de telles distributions de tailles des villes.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un ensemble de modèles candidats à l'explication de ce fait stylisé majeur. Nous avons limité notre étude aux modèles dynamiques, c'est-à-dire aux modèles qui simulent des dynamiques de croissance urbaine capables d'engendrer une structuration fortement hiérarchisée des systèmes urbains. Nous avons ainsi mis en évidence qu'il existe tout un panel de modèles à processus explicatifs. Beaucoup de formalisations différentes ont été proposées et chacune présente ses avantages et ses défauts. Les modèles économiques d'optimisation ne sont pas capables de rendre compte par la simulation de la structure caractéristique des systèmes de villes. Les modèles économiques aléatoires simulent des modèles de croissance *à la Gibrat* au prix d'hypothèses beaucoup trop contraignantes pour être réalistes. Les modèles d'interactions spatiales à équations différentielles sont peu testables sur données empiriques et sont incapables d'intégrer l'apparition de nouveautés pourtant essentielles à la croissance des systèmes urbains. Dans ce contexte, les formalisations par des systèmes multi-agents sont apparues comme très adaptées à la modélisation de la dynamique des systèmes urbains. Les modèles Simpop ont prouvé que les hypothèses théoriques qu'ils simulent sont capables de rendre compte d'un grand nombre de caractéristiques dynamiques de systèmes de villes. Pourtant les modèles Simpop présentent eux-aussi des inconvénients, inhérents à l'utilisation des modèles multi-agents, et parmi lesquels la difficulté de la mise en œuvre de plans d'expérimentation pour leur exploration et leur évaluation. Ainsi, l'organisation hiérarchique des systèmes urbains et la distribution des tailles de villes procèdent de mécanismes dont la nature fait encore débat, et ce malgré la diversité des modèles proposés. Le travail de théorisation, de conceptualisation et de modélisation autour de cette problématique est donc toujours d'actualité, d'autant plus que la modélisation reste encore un des meilleurs moyens pour expérimenter, c'est-à-dire pour tester des propositions théoriques.

La deuxième partie du chapitre s'appuie sur ces acquis de modélisation pour définir un nouveau cadre de modélisation nécessaire à la proposition et à la diffusion de nouveaux modèles de dynamique de systèmes de villes. Le travail de modélisation entrepris

pour cette thèse adopte l'approche multi-agents et plus particulièrement le concept de modélisation géographique développé pour les modèles de la famille Simpop. La conception d'outils adaptés permet cependant de dépasser les principaux écueils et les défis majeurs de l'utilisation de modèles multi-agents. Incorporés au sein du laboratoire virtuel SimProcess fondé sur le formalisme informatique OpenMOLE, ces outils favorisent :

- le recours à l'exploration massive (assistée par le calcul intensif) de modèles grâce à la mise en place de techniques d'exploration innovantes qui optimisent temps et espace de recherche. Les connaissances acquises grâce à ces explorations intensives des comportements du modèles sont des critères essentiels pour l'évaluation/validation du modèle, son applicabilité, etc.
- la répliquabilité des expérimentations grâce à la mise à disposition libre de tout le code informatique nécessaire à leur réalisation.
- le partage de ces nouvelles méthodes de modélisation et d'exploration grâce à un effort constant de conception générique de ces outils pour leur ré-utilisation sur d'autres modèles.

Ces outils d'exploration innovants permettent de définir une nouvelle démarche de modélisation multi-agents des dynamiques de systèmes urbains qui s'appuie à la fois sur un cadre méthodologique (une modélisation itérative et assistée par le calcul intensif), un cadre théorique (une modélisation par évaluation d'hypothèses relatives à la théorie évolutive urbaine) et un cadre descriptif (une modélisation communicable et appropriable par l'explicitation des hypothèses et des mécanismes implémentés). L'application de cette triple démarche a conduit à la proposition de deux nouveaux modèles de simulation de croissance urbaine. Ces deux modèles SimpopLocal et SimpopNet font l'objet des trois prochains chapitres de la thèse.

La nouveauté et l'originalité de ces modèles par rapport aux autres modèles de famille Simpop est double. D'abord ces deux nouveaux modèles proposent une forme différente de la modélisation de l'innovation. Dans les précédents modèles Simpop, le changement (c'est-à-dire l'innovation), mais aussi une partie de la croissance générale du système, sont engendrés par des mécanismes exogènes à la simulation. Les premiers modèles Simpop sont donc partiellement guidés par l'introduction explicite et tout au long de la simulation d'innovations dont les règles d'action sur le système sont spécifiées par le modélisateur. Ces règles, qui guident le changement du système de façon exogène à la dynamique interne de la simulation, contrôlent donc la trajectoire globale du système simulé. Les modèles SimpopLocal et SimpopNet endogénéisent en grande partie l'innovation et le changement dans le système. Les trajectoires de système ainsi simulées sont donc générées par les dynamiques internes au modèle. D'autre part le mode de conception de ces deux nouveaux

modèles permet un réel travail sur l'évaluation des mécanismes implémentés. Ce travail d'évaluation des mécanismes suscite un va-et-vient continu entre la théorie et le modèle extrêmement bénéfique au travail de théorisation et conceptualisation. Il conduit à la validation ou la réfutation des hypothèses théoriques.

SimpopLocal : un modèle de hiérarchisation des systèmes de peuplement sous contraintes environnementales

"La révolution urbaine est, sans nul doute après la révolution néolithique, l'événement le plus fondamental de l'histoire humaine."
(DEMOULE, 2007)

3.1	Modélographie des interactions société-environnement et de l'émergence du fait urbain	143
3.1.1	La modélisation multi-agents des interactions société-environnement dans le temps long	143
3.1.2	Six modèles d'interactions société-environnement	144
3.1.3	Comparaison des différentes approches de modélisation des interactions société-environnement et de l'émergence de l'urbanisation	147
3.1.4	Caractérisation des pratiques de modélisation	149
3.1.5	De l'apport d'un travail de modélographie	152
3.2	Le modèle SimpopLocal	155
3.2.1	Les enjeux de simulation (<i>Purpose</i>)	155
3.2.2	Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (<i>Entities, state variables and scales</i>)	156

3.2.3	Les dynamiques de SimpopLocal (<i>Processes overview and scheduling</i>)	158
3.2.3.1	Le mécanisme de croissance avec contraintes locales	158
3.2.3.2	Le mécanisme d'impact des innovations sur la croissance	159
3.2.3.3	Les mécanismes d'acquisition des innovations	160
3.2.3.4	Le mécanisme de création des innovations	160
3.2.3.5	Le mécanisme de diffusion des innovations	162
3.2.3.6	Le mécanisme de durée de vie des innovations . . .	164
3.2.3.7	Note sur la modélisation de l'acquisition et de l'impact des innovations	164
3.2.3.8	Note sur le nombre total d'agents innovation	165
3.2.3.9	Le mécanisme de catastrophes	166
3.2.4	Les formalismes d'implémentation du modèle SimpopLocal . .	166
3.2.5	Déroulement d'une simulation (<i>Design Concept</i>)	167
3.2.5.1	L'initialisation	167
3.2.5.2	Les conditions d'arrêt	168
3.2.5.3	Déroulement d'un pas de simulation	169

Introduction : explorer par la simulation les dynamiques d'un système de peuplement fortement contraint par les conditions locales

Dans le premier chapitre nous avons proposé d'étudier les dynamiques de croissance des systèmes urbains en distinguant des régimes de croissance qui se seraient succédés au cours de l'histoire. Nous avons ainsi identifié deux régimes de croissance (c.f. section 1.4.2), qui seraient consécutifs à deux ruptures dans les structures de l'organisation des systèmes de peuplement urbains, la révolution urbaine et la transition urbaine d'autre part. Une hypothèse très simplificatrice nous permet de différencier ces deux régimes de croissance différents à partir des ruptures observées : si l'on admet que l'accessibilité aux ressources joue comme une contrainte sur la croissance des centres de peuplement, c'est l'évolution des conditions de cette accessibilité qui fait basculer d'un régime de croissance à l'autre.

Le premier régime aurait été insufflé par l'émergence des premiers centres urbains qui aurait provoqué une réorganisation spatiale du système de peuplement, avec des centres de peuplement bien plus grands et hiérarchisés que les peuplements villageois antérieurs. L'hypothèse fondatrice de la modélisation de ce régime urbain postule que le début de l'émulation urbaine se manifesterait dans la multiplication des innovations. Celles-ci seraient favorisées par les connections entre les centres de peuplement qui auraient permis une mise en réseau de ressources, notamment des ressources techniques, et la diffusion de structures sociales nouvelles. Bien qu'amorçant une dynamique stimulante d'échanges entre centres de peuplement, ce régime reste caractérisé par une forte vulnérabilité. Cette vulnérabilité est liée à la violence des affrontements entre voisins ou envahisseurs, et à la faible capacité technique de résistance aux grandes catastrophes de type séisme ou inondations, ou encore irrégularités climatiques, plutôt fréquentes dans les régions subtropicales concernées. Cette vulnérabilité est donc causée par la faible épaisseur des accumulations réalisées (accumulations de techniques, de ressources, de savoirs, etc.), qui affaiblit les capacités de résilience des centres de peuplement aux catastrophes. Mais elle est aussi liée à une *tyrannie de la distance* (BAIROCH, 1985) qui limite les possibilités d'échanges entre centres de peuplement. En effet, durant ce régime les transports sont assujettis à une forte pénibilité et à des coûts très élevés. Ce premier régime dépeint donc une dynamique de réseau, mais qui est cependant limitée dans son expansion par la faible portée des transports et qui est contrainte par une grande vulnérabilité du système aux aléas. Il correspond à des périodes historiques anciennes où la disparition totale de certaines villes est assez fréquemment observée, même pour des entités urbaines déjà relativement grandes, abritant quelques milliers de personnes (HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990).

Dans ce chapitre, nous nous questionnons sur la possibilité d'explorer, par la modéli-

sation et la simulation, les implications de la considération d'un tel régime de dynamique de croissance d'un système de peuplement sous contraintes locales. Dans une mise en contexte scientifique de cette problématique, les quelques modèles qui ont déjà été proposés sur ces questions d'interactions société-environnement et de l'émergence du fait urbain sont d'abord exposés et comparés. Ce travail "modélographique" (de comparaison de modèles) nous permet ensuite de faire la synthèse des traitements déjà envisagés de cette question, de relever les apports et les lacunes de chaque approche et d'identifier les enjeux de modélisation pour la construction d'un nouveau modèle, le modèle SimpopLocal. Ce modèle est présenté dans une deuxième partie. Les entités, les mécanismes, le déroulement d'une simulation sont décrits de façon détaillée, en suivant du mieux possible le protocole de communication de modèle ODD (GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al., 2010). Comme les spécifications écrites ne suffisent pas à assurer la reproductibilité des modèles, le code source commenté du modèle (en scala) et le fichier d'initialisation utilisé pour toutes les expérimentations présentées dans ce travail sont disponibles en ligne à l'adresse <http://iscpif.github.io/simpoplocal-epb/>.

3.1 Modélographie des interactions société-environnement et de l'émergence du fait urbain ¹

3.1.1 La modélisation multi-agents des interactions société-environnement dans le temps long

En sciences sociales, et particulièrement en géographie et en archéologie, l'utilisation du paradigme des systèmes complexes et de la modélisation par des systèmes multi-agents est en pleine expansion, comme en témoigne le nombre grandissant d'articles et de livres consacrés à ce type de travaux (par exemple : KOHLER et LEEUW (2007) ; HEPPENSTALL, CROOKS et al. (2011) ou la parution de revues spécialisées comme JASSS (*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*). En effet, l'approche multi-agents s'avère être un outil très puissant pour caractériser et comprendre les systèmes socio-géographiques complexes². La simulation des interactions entre les entités élémentaires d'un système est une méthode utilisée pour définir, interroger, résumer ou illustrer des faits établis par les spécialistes (archéologues, géographes, sociologues, etc.) ou encore pour tester la plausibilité d'hypothèses plus générales sur des dynamiques socio-environnementales (SANDERS, 2007).

Ce contexte de recherche offre de nouvelles possibilités de réflexion pour l'étude de l'émergence de l'urbanisation. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre (c.f. section 1.4), les processus à l'origine de cette organisation sociale sont encore mal connus. Le mode de vie urbain a émergé à plusieurs reprises dans l'histoire du monde, de façon indépendante mais avec des formes similaires, dans des contextes historiques où la contrainte environnementale sur l'expansion de ces civilisations restait très forte. Le processus d'urbanisation aurait opéré dans des sociétés où le développement de l'agriculture avait permis un accroissement de la productivité du territoire, autorisant ainsi des densités de population environ cent fois plus élevées qu'auparavant (MARCUS et SABLOFF, 2008). L'urbanisation s'y est produite à des dates différentes, mais toujours un ou deux milliers

1. Cette partie a fait l'objet d'une publication dans la revue *Cybergeog* (SCHMITT et PUMAIN, 2013). Nous retranscrivons ici une grande partie du texte moyennant quelques adaptations nécessaires à la clarté du discours.

2. En 2011 ont débuté deux projets de recherche qui concentrent leurs efforts sur le développement de modèles multi-agents d'évolution de sociétés. Le projet ANR Transmondyn porte sur les grandes transitions dans l'évolution des systèmes de peuplement dans le temps long : l'enjeu est de caractériser les relations entre les contraintes environnementales, les interactions sociales et les innovations pour comprendre les évolutions des formes du peuplement. Le projet ERC GeoDiverCity porte sur la définition d'un ensemble de faits stylisés résumant les connaissances sur la dynamique des systèmes urbains complexes depuis l'émergence de l'urbanisation jusqu'aux dynamiques actuelles. Les faits stylisés ainsi définis servent de base pour la construction de nouveaux modèles explicatifs des dynamiques d'évolution des systèmes urbains.

d'années après l'apparition de l'agriculture, lorsqu'une certaine accumulation économique a permis de valoriser des formes d'organisation politico-religieuse et de division sociale du travail déjà en germe dans les sociétés agricoles (BAIROCH, 1985). Ainsi, la prise en compte des relations entre l'urbanisation, l'environnement et ses ressources semble essentielle à l'explication. Les modèles de simulation multi-agents facilitent la modélisation des interactions agent - environnement, car ils permettent d'agencer des entités de nature différente et de représenter la dynamique qu'elles produisent. De fait, ils ont été sélectionnés par de nombreux chercheurs comme des outils bien adaptés pour comprendre les mécanismes à l'origine de l'organisation sociale urbaine.

L'élaboration de ce type de modèle implique la reconstruction des interactions société - environnement. L'exercice est difficile pour deux raisons principales. Premièrement, les traces de ces interactions ne sont pas faciles à identifier ni à interpréter pour des périodes aussi anciennes. Deuxièmement, les hypothèses formulées sur la nature de ces interactions doivent ensuite être reformulées en langage informatique au sein d'un modèle de simulation. Comment modéliser les phénomènes socio-environnementaux qui ont conduit à l'émergence de l'urbanisation à partir de sociétés agraires subissant de fortes contraintes environnementales ? Quelles interactions simuler ? Comment les simuler ? Il existe plusieurs modèles multi-agents qui traitent de ces questions. Comme nous allons le voir, chacun propose une partie de solution au problème de la modélisation de l'émergence de l'urbanisation. Cependant, la nature des modèles eux-mêmes, l'évolution des techniques, la diversité des méthodes et des approches de modélisation choisies rendent difficile leur comparaison et celle de leurs conclusions. C'est pourquoi il semble important de les résumer, les comparer et les confronter, pour comprendre les apports spécifiques de chacun et identifier les améliorations possibles de l'un à l'autre (PUMAIN, 1991). Ce travail comparatif permet de définir un ensemble de directives pour la construction d'un nouveau modèle fondé sur la même problématique mais porteur de connaissances originales.

3.1.2 Six modèles d'interactions société-environnement

Six modèles ont été sélectionnés pour cette étude. Ils se rattachent tous à une même question d'ordre thématique. Leur analyse et leur comparaison forment la modélographie de la thématique étudiée. Le choix a été volontairement restreint aux modèles de formalisme multi-agents simulant des dynamiques spatialisées d'interaction société-environnement dans le temps long. À l'exception du modèle Sugarscape, atemporel mais sélectionné pour son statut particulier de précurseur, ces modèles portent tous sur des périodes historiques anciennes et simulent des dynamiques de sociétés fortement contraintes par la disponibilité en ressources. Les sociétés simulées sont fondées essentiellement sur une économie agraire. En plus de s'intéresser à la modélisation des interactions sociétés-environnement, les modèles choisis s'ancrent aussi dans la problématique de l'émergence

de l'urbanisation. La sélection se veut représentative des différentes approches présentes dans la littérature. Néanmoins, d'autres modèles illustrent aussi la question des interactions sociétés-environnements, qu'ils simulent des sociétés agraires de la préhistoire ou beaucoup plus récentes : comme les modèles d'évolution du paysage (POIX et MICHELIN, 2000), ou encore les modèles développés sur la plateforme Cormas³, dont une partie est construite suivant une approche participative ou sous forme de "jeux sérieux". Ces modélisations ne sont pas prises en compte ici car les modèles correspondants ne traitent pas de l'émergence de l'urbanisation ou de la concentration progressive de la population dans des centres urbains. Les modèles sélectionnés sont donc ceux dont les enjeux de modélisation se rapprochent le plus de notre problématique :

- le modèle Sugarscape, de J.M. Epstein et R. Axtell (EPSTEIN et AXTELL, 1996) ;
- le modèle Anasazi, du *The Artificial Anasazi Project* (GUMERMAN et al., 2003 ; AXTELL, EPSTEIN et al., 2002) ;
- le modèle The village Porject (appelé VILLAGE par la suite) ; du *Village Ecodynamics project* (KOHLE, JOHNSON et al., 2007) ;
- le modèle ENKIMDU, du *MASS project* (WILKINSON et al., 2007) ;
- le modèle Simpop, de l'équipe P.A.R.I.S. de l'UMR Géographie-cités (BURA et al., 1996 ; SANDERS et al., 1997) ;
- le modèle d'émergence de centres urbains (appelé ÉMERGENCE par la suite), de A. Ourednik et P. Dessemontet (OUREDNIK, 2010 ; OUREDNIK et DESSEMONTET, 2007) .

Afin de donner un cadre d'interprétation aux différentes méthodes de modélisation des dynamiques simulées dans les modèles sélectionnés, les modèles doivent pouvoir être décrits suivant une grille de lecture commune. La communication et la comparaison de modèles à base d'agents demande une interprétation des descriptions, souvent incomplètes, proposées par leurs auteurs (GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006 ; CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008). Cette interprétation est d'autant plus difficile que les codes sources des modèles sont rarement disponibles et qu'il est donc rarement possible de trouver les éclaircissements à d'éventuelles zones d'ombre dans les spécifications informatiques. Il est toutefois impossible d'appliquer ici le protocole de documentation ODD (GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006 ; GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al., 2010) car il exige une connaissance extrêmement précise des modèles et ne peut être développé que par les concepteurs et/ou modélisateurs eux-mêmes. Si tous les auteurs des modèles présentés

3. <http://cormas.cirad.fr/fr/outil/outil.htm>

ici avaient déjà employé une telle description formalisée, notre tâche modélographique aurait été grandement simplifiée.

Nous proposons donc un autre format de lecture et de description de modèles à partir des renseignements disponibles dans les publications. Cette lecture est orientée vers la clarification des choix de modélisation effectués pour étudier les dynamiques spatiales d'interaction société-environnement qui ont conduit dans le temps long à l'émergence ou à la structuration de l'urbanisation des sociétés. Chaque modèle est décrit suivant la même articulation :

- nom du modèle donné par les auteurs,
- références bibliographiques utilisées pour ce travail de comparaison,
- contexte de recherche dans lequel s'inscrit le développement du modèle,
- enjeux de modélisation,
- dynamiques simulées,
- sorties de simulation et résultats décrits par les auteurs,
- conclusions et remarques.

À l'exception du dernier, chaque point de cette grille de lecture est écrit le plus objectivement possible au regard des informations données dans la littérature. La dernière partie "Conclusions et remarques" est plus critique et subjective et permet de faire le lien entre les différents modèles. Cette démarche, qui conduit à présenter successivement chaque modèle, peut paraître laborieuse, mais commencer par une comparaison raisonnée en rendrait la compréhension difficile. En effet, les modèles choisis n'ont jamais été décrits sous une forme comparable et chaque modèle a ses objectifs spécifiques, ses propres mécanismes simulés, ses indicateurs de sorties de simulation et même sa propre logique de modélisation. Il est plus aisé de commencer par restituer, autant que possible, chaque modèle dans son intégrité grâce à une trame descriptive commune pour pouvoir ensuite les comparer. *Pour ne pas alourdir la lecture de ce chapitre, les descriptions des six modèles sont toutes placées en annexe (c.f. annexe A), à la discrétion du lecteur.* La comparaison des six modèles est finalement résumée dans le tableau 3.1 mettant en parallèle les choix de modélisation et les caractères essentiels de chaque modèle.

3.1.3 Comparaison des différentes approches de modélisation des interactions société-environnement et de l'émergence de l'urbanisation

Le tableau de la figure 3.1 résume la comparaison des méthodes de modélisation mises en œuvre par les six modèles sélectionnés. Ces modèles ont été choisis car ils s'ancrent tous dans la problématique générale d'émergence de l'urbanisation par la simulation de dynamiques spatialisées d'interactions société-environnement. Le tableau comparatif tient compte de ce contexte et rappelle les spécifications employées pour la définition des agents, la représentation de l'environnement dans lequel évoluent les agents et la nature des interactions entre la société simulée (définie par les attributs et les comportements des agents) et son environnement.

Les modèles présentés se différencient d'abord par la nature des agents qu'ils mettent en œuvre. La forme courante en sciences humaines et sociales de l'agent en tant qu'individu est finalement très peu utilisée : seuls Sugarscape et ÉMERGENCE se situent clairement dans cette catégorie. Les modèles Anasazi et VILLAGE ont été construits pour représenter des agents "ménages" et ainsi mieux se conformer aux données archéologiques (le dénombrement de population se fait souvent à partir des traces de foyers dont le nombre donne un ordre de grandeur de la taille des peuplements). Le modèle Simpop présente une forme originale d'agents. Ceux-ci sont utilisés en tant qu'entités collectives représentant des villages ou des villes qui sont donc considérés comme des entités élémentaires indivisibles. Le modèle ENKIMDU semble, lui, présenter les trois formes d'agents et modéliser chaque niveau social (individus, ménages, centres urbains) par différents types d'entités.

Au fil des projets, une évolution se dessine quant aux partis pris dans la modélisation des interactions société - environnement. Alors que, dans un premier temps, les modèles ne se consacraient qu'à l'effet des quantités de ressources offertes par l'environnement sur la localisation des entités d'une société (Sugarscape, Anasazi), les modèles ultérieurs traduisent un intérêt nouveau pour la boucle de rétroaction entre les comportements d'une société face à un environnement et l'impact de ces comportements sur cet environnement (ENKIMDU, VILLAGE, ÉMERGENCE). Dans les modèles ENKIMDU et VILLAGE, les actions des agents sur l'environnement, qui sont modélisées pour ajuster au mieux les données empiriques, représentent surtout des impacts négatifs (par exemple : plus la terre est cultivée moins elle sera productive par la suite) et ces rétroactions négatives passent par des sous-modèles complexes (module d'hydrologie et de dynamiques de sols par exemple). Les modèles Simpop et ÉMERGENCE traitent ces rétroactions société - environnement de façon opposée (rétroactions positives) : les agents vont pouvoir dépasser les limites environnementales préétablies et non pas uniquement les subir.

Le traitement du processus d'agglomération de l'habitat est lui aussi très variable d'un

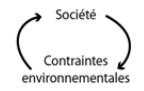
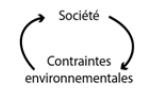
	Sugarscape	Anasazi	The Village Project	ENKIMDU	SimPop	Emergence de centres urbains
But du modèle	Modéliser l'émergence d'inégalités dans une société.	Expliquer les dynamiques démographiques et les choix de localisation des foyers en fonction des caractéristiques dynamiques de la productivité en ressources dans l'environnement.	Expliquer les dynamiques démographiques, de localisation et d'agrégation des foyers en fonction de comportement sociaux et des caractéristiques dynamiques de la productivité en ressources dans l'environnement.	Etudier les capacités d'adaptation et de résilience aux variations des conditions environnementales des premières sociétés urbaines à partir de la modélisation des comportements individuels.	Modéliser l'évolution dans le temps long de la hiérarchisation et de l'organisation spatiale d'un système de peuplement urbain à l'échelle régionale.	Modéliser l'émergence de centres urbains en fonction des interactions entre deux types d'agents : les producteurs de ressources et les spécialistes innovateurs.
Agents	Des individus, au sens propre, mobiles.	Des ménages dont les localisations de l'habitat et des cultures évoluent.	Des ménages dont les localisations de l'habitat et des cultures évoluent.	Plusieurs entités possibles depuis l'individu jusqu'à la communauté.	Des entités urbaines (centres urbains) indivisibles et fixes.	Deux types d'individus mobiles, les producteurs et les spécialistes urbains .
Environnement (ressource)	Des cellules productrices de ressources (du sucre).	Des cellules productrices de ressources dont les rendements ont été établis de façon empirique et quantitative.	Des cellules dont les caractéristiques sont particulièrement détaillées (modèles couplés de climat, de rendement des sols, de population de gibier etc.)	Des cellules dont les caractéristiques sont particulièrement détaillées (modèles couplés de climat, de rendement des sols, etc.)	Des cellules productrices de ressources, dont les rendements sont dépendants du temps de simulation et du type d'agent localisé sur la cellule.	Des cellules caractérisées par une capacité maximale de production en ressource mais avec un rendement dépendant des agents alentour.
Interactions agents - environnement	La répartition spatiale de la disponibilité en ressource conditionne les lieux de récoltes, la localisation et la mort des agents, et donc la taille de la population totale et sa répartition spatiale.	Les quantités des ressources pouvant être produites sur chaque cellule conditionnent les récoltes, la localisation, la mortalité et la natalité des agents donc la taille de la population totale et sa répartition spatiale.	Les quantités des ressources pouvant être produites sur chaque cellule conditionnent les comportements de survie et de localisation des agents mais ces comportements ont un impact sur les ressources.	Les quantités des ressources pouvant être produites sur chaque cellule conditionnent les comportements de survie et de localisation des agents mais ces comportements ont un impact sur les ressources.	La disponibilité en ressource sur les cellules conditionne initialement la taille de la population locale mais celle-ci influence ensuite la disponibilité en ressource.	Les quantités de ressource pouvant être produites conditionnent la naissance et la mort des agents et donc la taille et la répartition de la population mais celle-ci joue en retour sur la productivité des ressources.
						
Traitement du processus d'urbanisation	Faible : La localisation des agents en fonction des disponibilités en ressource conduit à des gradients de densité d'agents.	Faible : La localisation des agents en fonction des disponibilités en ressource conduit à des gradients de densité d'agents.	Moyen : Le processus d'agrégation de la population s'opère par la relocalisation des agents en fonction de leurs liens sociaux et conduit à l'émergence de centres communautaires.	Fort : L'évolution de la taille démographique et de l'emprise spatiale d'un centre urbain et de son hinterland dépendent de leur gestion par les agents et des fluctuations environnementales.	Fort : L'expansion et la hiérarchisation des centres urbains dépendent des interactions (échanges économiques) entre les agents villes.	Fort : L'émergence de noyaux urbains, leur répartition spatiale et l'évolution de leur taille dépendent des productions de ressource, i.e. des interactions entre agents producteurs et spécialistes urbains.

Figure 3.1 – Comparatif des approches de modélisation des six modèles sélectionnés

modèle à l'autre. S'il n'est pas vraiment explicite pour les deux premiers modèles présentés, qui ne le traitent que par le biais de gradient de densité de population, il devient un fort enjeu de modélisation pour les quatre derniers modèles. Les formes de modélisation de ces dynamiques sont très diverses : évolution de l'emprise spatiale d'une ville (ENKIMDU), évolution d'un système de peuplement en villages vers un système de villes (Simpop), mécanismes sociologiques à l'origine de l'aggrégation de l'habitat (VILLAGE) et émergence de la localisation des centres urbains sur un territoire (ÉMERGENCE).

3.1.4 Caractérisation des pratiques de modélisation

BANOS et SANDERS (2012) ont proposé une grille de lecture qui permet de catégoriser les modèles selon deux dimensions : la première est relative au degré d'abstraction du phénomène empirique représenté par le modèle, l'autre a trait au dispositif que le modélisateur met en place pour y parvenir. Le premier axe oppose ainsi des modèles « particuliers », appliqués à un exemple réel et appuyés sur une connaissance précise du contexte grâce à des données empiriques (on pourrait parler de modèles *data-driven*) et des modèles « stylisés » reproduisant des mécanismes plus généraux (on pourrait parler alors de modèles *concept-driven*). Le deuxième axe traduit le niveau de simplification du processus modélisé. Dans l'approche de modélisation KISS - Keep It Simple, Stupid -, l'enjeu est de reproduire la complexité du phénomène modélisé à partir des mécanismes les plus simples possibles. La complexité d'un modèle KISS à base d'agents doit donc résider dans les résultats issus de sa simulation, non dans ses hypothèses (Simon 1969, cité par (BANOS et SANDERS, 2012)). L'approche KIDS - *Keep It Descriptive, Stupid* - (EDMONDS et MOSS, 2005) s'oppose à cette injonction à la simplification. L'enjeu est alors de conserver une approche explicative et de "*rendre toute partie du modèle isomorphe (similaire de structure)*" aux phénomènes que l'on cherche à modéliser (AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007). La grille de lecture croisant ces deux axes permet donc de définir quatre grandes pratiques de modélisation. Cette grille de lecture a été conçue pour classer les grandes familles de modèles en géographie urbaine, depuis les modèles très théoriques tels que la loi gravitaire et le modèle de croissance logistique jusqu'aux modèles à équations différentielles ou de simulation multi-agents. Pour appliquer cette grille de lecture aux six modèles étudiés, les échelles des axes doivent être modifiées pour passer d'un référentiel englobant tous les formalismes de modélisation possibles à un référentiel propre au formalisme multi-agents. L'échelle de l'axe KISS-KIDS est la plus affectée par ce changement. Dans le référentiel multi-agents, elle reflète le degré de parcimonie dans le choix des mécanismes et le nombre de paramètres. La figure 3.2 propose une organisation des six modèles étudiés selon ces deux axes⁴.

4. Il faut préciser que cette organisation reste relativement subjective et peut être débattue. Elle reflète notre appréciation de la complexité relative des mécanismes de chaque modèle.

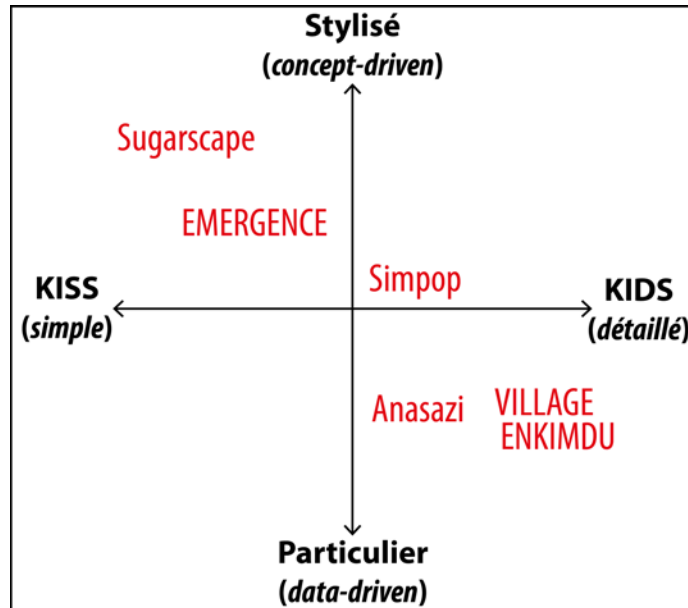


Figure 3.2 – Classification des approches de modélisation des six modèles sélectionnés

La figure 3.2 tend à montrer que les deux dimensions ne sont pas totalement indépendantes pour les six modèles. On peut distinguer deux approches antagonistes de modélisation, entre lesquelles se positionnent graduellement les six modèles multi-agents :

- Des modélisations descriptives et appliquées (Anasazi, VILLAGE, ENKIMDU). En s'appuyant sur des données extrêmement détaillées, ces modélisations cherchent à reconstituer et reproduire la complexité d'un phénomène particulier en usant de mécanismes très descriptifs mais au prix d'un grand nombre de paramètres ;
- Des modélisations au contraire beaucoup plus théoriques et abstraites (Sugarscape et ÉMERGENCE). Les mécanismes sont construits à partir d'hypothèses théoriques ou de faits stylisés, ce qui permet d'explorer un domaine beaucoup plus large d'interactions société-environnement mais peut-être au prix de leur vraisemblance. Ces modélisations suivent le principe de parcimonie en limitant le nombre de mécanismes et de paramètres.

Le modèle Simpop est en situation intermédiaire et semble construire un pont entre les deux pratiques de modélisation. Ce modèle ayant pour but de reproduire des faits stylisés est plutôt *concept-driven*, mais les mécanismes simulés, plus descriptifs et plus représentatifs d'une réalité observée, sont destinés à permettre une confrontation à des données empiriques. On peut voir un aboutissement de cette progression avec les modèles SIMPOP2 (Bretagnolle, Pumain, 2010) et Eurosims (Sanders, 2005), qui appliquent le cadre de modélisation Simpop à des systèmes de villes réels. BANOS et SANDERS (2012) ont décrit de tels cheminements possibles entre les grandes pratiques de modélisation, allant d'une

modélisation *concept-driven* à une modélisation *data-driven*. De même, la complexification graduelle de Sugarscape, au fur et à mesure des chapitres du livre qui introduit le modèle *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*, illustre la même démarche, aboutissant finalement au modèle Anasazi. Le projet Village Ecodynamics donne l'exemple d'un autre type de cheminement. Dans le cadre strict et *data-driven* de la simulation du contexte environnemental du modèle Village, les chercheurs du projet intègrent peu à peu des modèles beaucoup plus théoriques de comportements sociaux, économiques ou politiques pour étudier leurs impacts sur les tailles de groupes et de villages qui se constituent au cours de la simulation.

Ces démarches de complexification progressive, recommandées par le courant de modélisation KISS, apparaissent comme une des meilleures réponses disponibles aux défis de validation des modèles multi-agents (c.f. section 2.2.1). Les modèles descriptifs et appliqués semblent se doter d'une validation externe, selon que le modèle reproduit des dynamiques ou sorties de simulations qui sont plus ou moins proches des données empiriques. Mais la capacité du modèle à les reproduire ne garantit pas que les dynamiques simulées soient de vraies candidates à l'explication (c.f. section 2.1.2.4), comme le montre l'expérience de JANSSEN (2009) sur le modèle Anasazi⁵. Il faut s'assurer que les résultats obtenus sont bien le produit des interactions simulées. La validation externe, qui évalue la performance du modèle en fonction de l'adéquation entre sortie de simulation et données empirique et/ou connaissances théoriques, est essentielle, mais elle doit être intégrée à un cycle de validation plus complet qui teste l'effet des mécanismes simulés sur les sorties de modèles. Mais parce qu'elle repose sur des explorations massives des comportements du modèle, la pratique de ces tests s'avère d'autant plus laborieuse que l'espace de paramétrage du

5. Le modèle Anasazi est largement inspiré du modèle Sugarscape (dont les auteurs sont également impliqués dans le projet Anasazi), et peut même en être considéré comme une application à une région très bien connue et documentée, la Long House Valley. La masse des données injectées dans le modèle le rend "réaliste", en ce qu'elle permet de comparer directement les sorties du modèle avec des données réelles. Ce type de modèle "guidé par les données" (*data-driven*) comporte cependant le risque de ne guère apporter de contribution significative. C'est selon JANSSEN (2009) la principale faiblesse du modèle Anasazi. Cet auteur a en effet reproduit le modèle et est arrivé à la conclusion que les sorties de simulation sont davantage dépendantes des données introduites dans la simulation que des dynamiques internes au modèle. Ce travail certes confirme les résultats publiés mais surtout montre que le modèle apporte finalement peu à l'explication des phénomènes démographiques observés dans la Long House Valley. Le résultat le plus intéressant du modèle Anasazi était que les données environnementales ne permettent pas d'expliquer entièrement l'abandon de la vallée, mais l'analyse de M. Janssen montre que cette réussite est largement due à la qualité d'ajustement par le modèle des potentiels de production dans la vallée, les ajustements des variables qui déterminent les comportements sociaux des agents ayant beaucoup moins de poids sur les sorties de simulation. Le modèle agit plutôt comme une fonction de lissage des données d'entrée et les dynamiques simulées ne contribuent que trop faiblement aux sorties de simulations. Le fait que l'abandon de la vallée par les Anasazis ne puisse être expliqué par les seules raisons environnementales est démontré par le modèle mais aurait tout aussi bien pu être démontré – plus simplement – en calculant et comparant l'évolution de la capacité d'accueil de la vallée et celle de la démographie de la région.

modèle est large, que le modèle présente de nombreuses interactions non-linéaires, de nombreux mécanismes à étudier, beaucoup d'hétérogénéité, une stochasticité de certains mécanismes, un temps de simulation long, etc. Une démarche de complexification progressive du modèle, telle que nous l'avons décrite dans le deuxième chapitre (c.f. section 2.2) et grâce à la plateforme SimProcess d'exploration de modèle, permet de répartir les charges d'exploration et de validation au fur et à mesure des cycles de développement théorique et informatique. Elle permet de passer d'un modèle très (trop) épuré mais *évalué* (autant que possible) à un modèle plus satisfaisant pour les spécialistes (c.f. section 2.2.2).

3.1.5 De l'apport d'un travail de modélographie

Les six modèles présentés sont conçus pour comprendre les évolutions démographiques d'une société agraire soumise à de fortes contraintes environnementales. Ces évolutions démographiques sont les résultantes d'un équilibre dynamique entre ce que l'environnement peut offrir à un moment donné, la taille de la population et son organisation sociale. Comme le montre cette étude, les possibilités de simuler ces dynamiques sont très variées, mais elles sont complémentaires car elles aboutissent à des modèles très différents qui renseignent sur plusieurs aspects des interactions société-environnement.

Le travail modélographique de comparaison de modèles met en évidence les apports et la complémentarité de chaque approche. Il permet ainsi de préparer la construction d'un nouveau modèle qui tient compte de ces constats et qui s'adapte aux besoins de connaissances ayant pu être relevés. Dans ce contexte nous voulons proposer un autre modèle d'interaction société-environnement. Ce modèle ne se consacre pas aux simulations des interactions au niveau des agents-individus d'une société comme dans la grande majorité des modèles présentés ici, mais plutôt à la simulation des grandes tendances de structuration et d'organisation d'un système de peuplement, à la manière du modèle Simpop. Mais dans la théorie urbaine sur laquelle le modèle Simpop se fonde, les interactions homme-environnement ou le processus de la contrainte environnementale locale ne sont pas au cœur du problème. Néanmoins, Simpop traite de façon originale l'émergence de l'urbanisation. Alors que le modèle VILLAGE s'intéresse au processus d'apparition et de localisation d'agrégation spatiale de population, dans le modèle Simpop la localisation des possibles futurs centres urbains est fixe, et c'est l'émergence de la répartition et l'organisation spatiale des tailles de ces centres urbains qui est étudiée en la comparant à ce que prévoit la théorie des lieux centraux. Le modèle Simpop se différencie des autres modèles présentés par son approche de modélisation. Une première originalité réside dans le choix des entités élémentaires modélisées. Les agents du modèle Simpop sont des entités collectives complexes, ils représentent des villages ou des villes et non pas des individus ou des ménages comme dans les autres modèles. Ensuite, plutôt que de s'appuyer directement sur des données empiriques ou des mécanismes inventés, les mécanismes simulés

sont conçus pour reproduire des faits stylisés tirés de la théorie urbaine. La validation du modèle ne passe donc plus par l'adéquation des simulations avec des données empiriques mais par la capacité du modèle à reproduire les ordres de grandeur et les grandes tendances de trajectoire des systèmes urbains. Cependant le modèle Simpop est partiellement guidé par l'introduction tout au long de la simulation de règles exogènes qui contrôlent la trajectoire globale du système simulé. Dans quelle mesure peut-on affirmer que l'organisation et la hiérarchisation du système simulé émerge autant des interactions interurbaines que de l'introduction régulière de certains événements exogènes (introduction de nouvelles fonctions urbaines à des moments clés de la simulation par exemple) ?

Nous proposons donc un nouveau modèle, le modèle SimpopLocal. L'enjeu de ce nouveau modèle est de permettre de réfléchir de façon plus ciblée sur les interactions société-environnement que ne le proposait le premier modèle Simpop, tout en conservant une même approche *concept-driven* fondée sur la théorie évolutive urbaine. SimpopLocal propose donc une modélisation des processus de hiérarchisation d'un système de peuplement selon un régime de croissance fortement contraint par les conditions locales, en plaçant au centre des processus les interactions société-environnement, conformément au premier régime de croissance des systèmes urbains que nous avons défini. Pour répondre aux exigences d'évaluation des modèles, qui apparaissent en conclusion de cette section modélographique, nous ancrons notre démarche de modélisation dans un processus de complexification progressive, en développant une méthode d'évaluation systématique des mécanismes du modèle. Le modèle SimpopLocal tel que nous le présentons dans ce chapitre et le chapitre suivant est un modèle exploratoire, dans sa première version, la plus épurée. Il ne se veut pas représentatif d'un système de peuplement proto-historique connu, mais donne plutôt une première proposition de modélisation par des faits stylisés de la dynamique identifiée. Cette sobriété initiale permet une exploration intensive des comportements simulés et apporte des premières réponses sur l'évaluation des mécanismes implémentés. Ces résultats seront présentés dans le chapitre 4. La suite de ce chapitre décrit en détail le modèle et donne les clés de lecture de cette première version du modèle. Cette étape est essentielle à la bonne compréhension et à l'appropriation du modèle pour ceux qui voudraient l'utiliser comme noyau ou outil de construction pour l'élaboration de modèles adaptés à des questions spécifiques ou encore à des contextes historiques bien connus et documentés. Ces adaptations pourront se constituer autour de scénarios sur des variations de valeurs de paramétrage ou de modifications/ajouts de mécanismes.

Pour conclure, le travail modélographique propose une méthode pour harmoniser, communiquer et transmettre les choix et les pratiques de modélisation dans un contexte où le partage des connaissances est encore difficile et trop peu réalisé en raison de l'hétérogénéité des moyens employés (PUMAIN, 1991 ; CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008 ; AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007 ; GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006). Mais il permet aussi de comparer un ensemble de modèles unis par une problématique

commune pour mettre en évidence les spécificités et la complémentarité de chaque approche de modélisation, préparant ainsi à la construction d'un nouveau modèle qui en tiendrait compte et qui s'adapterait aux besoins de connaissances ayant pu être relevés. Pour ces deux raisons, la systématisation du travail modélographique pourrait apporter beaucoup à la communauté multi-agents.

3.2 Le modèle SimpopLocal

Nous entamons dans cette partie la description du modèle SimpopLocal tel qu'il a été conçu et implémenté. Comme nous l'avons expliqué dans la section 2.2.4.1 du deuxième chapitre, nous suivons au mieux le protocole de description ODD dans cette partie. Afin d'adapter au mieux cette méthode à la description du modèle SimpopLocal, l'ordre des éléments descriptifs est perturbé, des parties descriptives qui n'entrent pas explicitement dans le schéma du protocole ODD sont ajoutées alors que d'autres, peu adaptées, sont retirées. Pour rappeler au lecteur la correspondance avec le protocole ODD, la dénomination des éléments descriptifs ODD sont placés entre parenthèses dans les titres de paragraphes.

3.2.1 Les enjeux de simulation (*Purpose*)

SimpopLocal a été conçu pour étudier l'émergence de la structuration et de la hiérarchisation d'un système de peuplement en simulant les dynamiques de croissance de points de peuplement dont le développement est entravé par de fortes contraintes locales et environnementales mais qui sont progressivement repoussées grâce à l'adoption d'innovations.

Ce modèle exploratoire cherche à reproduire un aspect remarquable de la structure spatiale des systèmes de peuplements, bien défini dans la littérature comme un fait stylisé majeur (le fait stylisé 1, c.f. section 1.5) : quelque soit le système étudié, n'importe où dans le monde ou n'importe quand dans l'histoire et la pré-histoire, la distribution des tailles (de la population ou de son emprise spatiale) est très fortement différenciée, avec un très grand nombre de petits points de peuplement et un très petit nombre de grands points de peuplement (BERRY, 1964 ; JOHNSON, 1977 ; FLETCHER, 1986 ; LIU, 1996 ; DURAND-DASTÈS et al., 1998 ; GARMY, 2009). La forme hiérarchique et sa particularité structurale (ordre de la hiérarchie des entités constituantes) au niveau géographique macroscopique de ces systèmes est particulièrement résiliente dans le temps, malgré les fluctuations locales (au niveau des entités constituantes) des réponses aux grands courants de développement. Cette hiérarchie tend à se renforcer au fur et à mesure de l'accroissement du système. Elle peut être modélisée par des distributions puissance quand les très petits points de peuplement ne sont pas considérés ou par des distributions log-normale quand ces petits points de peuplement sont intégrés dans l'étude (c.f. section 1.1.1). Ces distributions sont aisément reproduites par simulation à partir de mécanismes stochastiques et non-spatiaux (c.f. section 2.1.2). Mais cette explication purement stochastique d'une telle réalité sociale semble incomplète puisque les écarts observés à ce modèle sont quasi-systématiques (c.f. section 2.1.2.4). L'enjeu du modèle SimpopLocal est de modéliser cette hiérarchisation par des processus de répartition de la croissance qui ne soient pas entièrement dus au hasard. Ce modèle ne simule pas le fonctionnement quotidien d'un système de peuplement mais est conçu pour représenter une évolution bien ciblée : sa hiérarchisation. Dans ce contexte

ne sont considérés comme constitutifs et ne sont donc simulés que les processus qui entrent en jeu dans cette transformation du système. Pour identifier et sélectionner ces processus constitutifs, on choisit de s'appuyer sur la théorie évolutive urbaine (c.f. 1.5.2) et de s'affilier à la lignée des modèles Simpop. Aussi les processus modélisés de répartition de la croissance incorporent les notions d'interactions entre les entités élémentaires et de complexification du système.

Par rapport aux modèles Simpop précédents, l'originalité de SimpopLocal est double. D'abord, SimpopLocal représente une version simplifiée qui ne distingue plus qualitativement les *fonctions urbaines* successives durant l'évolution des systèmes urbains mais les transpose dans un processus abstrait d'innovation. De plus, le processus d'apparition de ces innovations est endogénéisé dans la dynamique du modèle alors que dans les autres modèles Simpop il était encore géré de façon exogène. De la sorte, Simpoplocal s'inscrit dans une démarche de modélisation plus légère que les autres modèles Simpop : le nombre de mécanismes et de règles de simulations est nettement réduit. Cette simplification a pour enjeu une meilleure exploration des simulations dans un souci d'évaluation du modèle multi-agents.

3.2.2 Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (*Entities, state variables and scales*)

Le modèle SimpopLocal simule la croissance des points de peuplement, abritant principalement des agriculteurs sédentarisés. Cette croissance est limitée par les contraintes locales qui sont progressivement repoussées par des innovations successives. Ce scénario pourrait trouver écho dans certains territoires en économie agraire au moment de l'émergence des premiers centres urbains. Ces régions auraient été caractérisées par une densité de population déjà nettement augmentée par rapport à la densité caractéristique des sociétés de chasseurs-cueilleurs grâce à l'effet de la sédentarisation, des pratiques agricoles et de l'accumulation de ressources par le stockage. Mais elles seraient encore très peu dominées par l'influence économique de villes ou de grands peuplements à large sphère d'influence (c.f. section 1.4.2).

Le paysage simulé est composé de 100 points de peuplements. Chaque point de peuplement correspond à un groupe humain localisé, repéré par son habitat permanent et qui exploite pour sa survie les ressources de son environnement proche. Les points de peuplements sont modélisés par des agents fixes. Ces unités élémentaires de peuplements sont autonomes et indépendantes et n'ont pas connaissance du système qu'elles constituent avec les autres unités de peuplement. Chacune est décrite par trois variables : localisation dans l'espace simulé (x, y) , la taille de sa population P et la quantité de ressources disponibles dans son environnement local R . La quantité de ressources disponibles est quantifiée

en nombre d'habitants et peut être comprise comme la capacité d'accueil de l'environnement local. La quantité de ressources disponibles de chaque peuplement dépend d'une valeur initiale mais surtout des compétences mises en œuvre par la population locale pour leur exploitation. Cette exploitation est réalisée localement et le partage ou le commerce de ressources entre différents points de peuplement ne sont pas explicitement représentés dans ce modèle. Les compétences d'exploitation des ressources sont exprimées dans le modèle par le nombre d'innovations que chaque point de peuplement a pu acquérir.

La modélisation des dynamiques de croissance de chaque point de peuplement suit le postulat que sa taille démographique est conditionnée par les ressources disponibles et donc par les compétences mises en œuvre par la population pour leur exploitation (mécanisme de croissance des points de peuplement, section 3.2.3.1). L'acquisition d'innovations permet de développer les compétences d'exploitation des ressources et donc d'accroître la quantité de ressources localement disponibles. Chaque nouvelle acquisition d'une innovation par un point de peuplement lui permet de dépasser un nouveau seuil de la capacité d'accueil de son espace d'implantation et donc de gagner une marge de croissance démographique.

Les innovations simulées ne sont pas qualitativement différenciées. L'effet produit par leur acquisition pourrait par exemple correspondre à une augmentation de la productivité ou à de nouvelles formes plus efficaces de gestion, de stockage, de conservation ou encore de production des ressources, bien que ces effets ne soient pas explicitement différenciés par la simulation. L'effet de leur acquisition sur chaque point de peuplement va dépendre de l'état de ce point de peuplement (mécanisme d'impact des innovations sur la croissance, section 3.2.3.2). Chaque innovation acquise par un point de peuplement est modélisée comme un agent. Elle peut apparaître spontanément dans ce point de peuplement (mécanisme d'apparition des innovations, section 3.2.3.4), dans ce cas un nouvel agent innovation est généré, ou être acquise par diffusion (mécanisme de diffusion des innovations, section 3.2.3.5), alors un nouvel agent est généré par clonage de l'agent innovation qui s'est diffusé. En effet, bien que l'échange commercial ne soit pas explicite dans le modèle, les unités de peuplement sont cependant en interaction suivant un réseau d'interaction entre points de peuplement, ce qui permet à leurs habitants d'échanger des connaissances au sujet des innovations qui améliorent leurs compétences pour l'exploitation des ressources. Chaque agent innovation est identifié par trois éléments (c.f. figure 3.3) : un identifiant propre *Id*, l'identifiant *rootId* de l'innovation qui serait l'ancêtre commun à la lignée d'innovations apparue par diffusion d'innovations de cette lignée (dans le cas d'une innovation acquise par création et non par diffusion, l'identifiant propre et l'identifiant de l'innovation mère sont identiques), et la date *date* (ou le pas de simulation) de l'acquisition de cette innovation par le point de peuplement. Cette double identification permet de prévenir une acquisition multiple de la *même* innovation, c'est-à-dire pour un même point de peuplement d'acquérir par diffusion plus d'une innovation qui proviendrait

d'un même ancêtre commun. La date de création permet de surveiller l'âge des innovations (mécanisme de durée de vie des innovations, section 3.2.3.6). Nous reviendrons sur ces points lors de la description précise du mécanisme de diffusion.

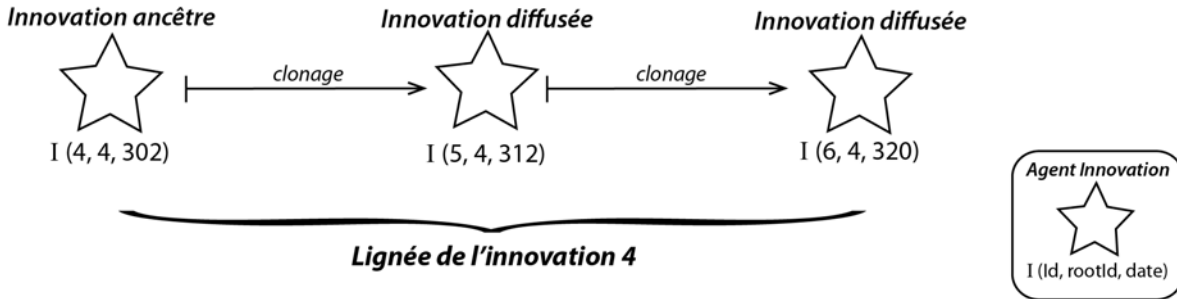


Figure 3.3 – Création et transmission des attributs des agents innovation

La dynamique de ce système de peuplement se caractérise aussi par une grande vulnérabilité aux aléas qui pèsent sur l'évolution des ressources et sur celle de la population : les catastrophes naturelles (accidents climatiques, séismes), les épidémies ou épizooties, ou encore les conflits entre groupes voisins, sont à tout moment susceptibles de détruire une partie de la population et des richesses d'un point de peuplement. Ces aléas ne sont pas modélisés de façon explicite mais résumés au sein d'un mécanisme élémentaire (mécanisme de catastrophes, section 3.2.3.9).

3.2.3 Les dynamiques de SimpopLocal (*Processes overview and scheduling*)

3.2.3.1 Le mécanisme de croissance avec contraintes locales

La dynamique de croissance des points de peuplement est simulée suivant l'hypothèse que leur taille est fonction de la quantité de ressources localement disponibles. Cette fonction de croissance s'inspire du modèle de VERHULST (1838) dans sa forme discrète, aussi appelée suite logistique. Au cours de la simulation, la taille du peuplement tend progressivement vers une population maximale, définie par le facteur limitant R_M^i suivant une courbe en S (courbe logistique), telle que :

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot [1 + r_{growth} \cdot (1 - \frac{P_t^i}{R_M^i})]$$

P_t^i est la population du point de peuplement i au temps t . Le paramètre limitant de la croissance R_M^i est la capacité d'accueil de ce point de peuplement, c'est-à-dire la quantité de ressources disponibles qui dépend du nombre M d'innovations acquises par le point

de peuplement. La constante de croissance du modèle de Verhulst r_{growth} ⁶ est exprimée comme un taux de croissance annuel, de telle manière que chaque pas de simulation représente une année de croissance démographique potentielle. Ce paramètre, tel qu'il est décrit dans l'équation du modèle de Verhulst, est un paramètre fixe qui ne dépend ni de i ni de t (il garde donc la même valeur quelque soit le point de peuplement considéré et quelque soit le temps de simulation). D'après l'équation, il représente une croissance maximale possible par pas de simulation qui ne peut être atteinte que lorsque la taille de la population de P_t^i est très petite devant le facteur limitant R_M^i . Par conséquent, si les facteurs limitant de la croissance de chaque point de peuplement sont souvent atteints (ce qui est le cas dans les simulations de SimpopLocal), la croissance annuelle simulée sera toujours nettement inférieure à la valeur prise par le paramètre r_{growth} . Ce constat rend difficile l'interprétation du paramètre r_{growth} . Il ne peut pas correspondre à un taux de croissance observé et ne peut pas être paramétré en fonction des données empiriques. Comme il a la même valeur pour tout les entités du systèmes et reste fixe durant la simulation, il correspondrait à une caractéristique du système plutôt qu'à une caractéristique de chaque entité.

3.2.3.2 Le mécanisme d'impact des innovations sur la croissance

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'acquisition d'une innovation par un point de peuplement lui permet de dépasser les limitations à la croissance en permettant une extraction plus efficiente des ressources locales et de ce fait un gain dans la marge de croissance possible. Concrètement une innovation agit sur le point de peuplement qui l'acquiert en augmentant la quantité de ressources qui lui est localement accessible. Un seul type d'innovation est simulé et son impact ne diffère qu'en fonction de l'état du point de peuplement quand l'acquisition est faite, c'est-à-dire du nombre d'innovations déjà acquises par ce point de peuplement.

Avec l'acquisition d'innovations, la quantité de ressources disponibles d'un point de peuplement R_M^i tend vers une quantité de ressources disponibles maximale, qui correspond à la capacité d'accueil maximale de l'environnement simulé R_{max} :

$$R_M^i \xrightarrow{\text{Acquisition d'innovations}} R_{max}$$

6. LANGLOIS et DAUDÉ (2007) rappellent que la suite logistique peut avoir un comportement chaotique. Pour l'éviter et observer une convergence de la suite vers le facteur limitant (ici R_M^i), il faut que la constante de croissance (ici r_{growth}) appartienne à l'intervalle de valeur $[0; 2]$. Au regard des taux de croissance démographique annuels de villes, de régions ou de pays observés de tout temps ou dans tous les continents, des taux de croissance supérieurs à 200% sont difficilement imaginable. Dans le cadre du modèle SimpopLocal nous nous situerons toujours dans des domaines de paramétrage produisant des comportements loin du chaos ou des oscillations pour ce mécanisme.

Le mécanisme de cet impact suit le modèle de Ricardo de rendement décroissant, qui peut lui-aussi être formalisé par une suite logistique en temps discrets (TURCHIN, 2003). Le paramètre *InnovationImpact* représente l'impact de l'acquisition d'une innovation et a un effet de moins en moins fort sur l'augmentation de la quantité de ressources disponibles R_{M+1}^i avec l'acquisition des innovations (figure 3.4) :

$$R_{M+1}^i = R_M^i \cdot [1 + InnovationImpact \cdot (1 - \frac{R_{M+1}^i}{R_{max}})]$$

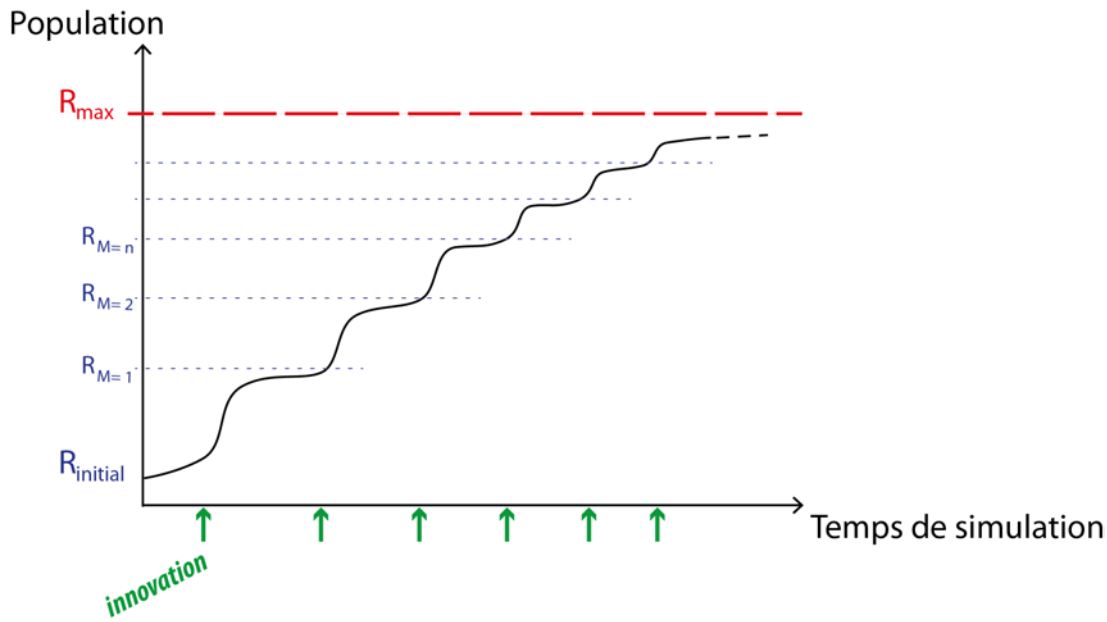


Figure 3.4 – Schématisation de l'impact de l'acquisition successive d'innovations sur l'évolution de la population d'un point de peuplement

3.2.3.3 Les mécanismes d'acquisition des innovations

L'acquisition d'une innovation par un point de peuplement peut se dérouler selon deux mécanismes : l'apparition par création, au sein d'un point de peuplement, d'une innovation nouvelle au système, ou la diffusion d'une innovation déjà existante dans le système par transmission de point de peuplement en point de peuplement. Dans les deux cas, les interactions entre les individus d'un point de peuplement ou entre les individus de différents points de peuplement sont le moteur des mécanismes d'acquisition d'innovations.

3.2.3.4 Le mécanisme de création des innovations

Dans cette version du modèle, l'apparition par création d'une innovation au sein d'un point de peuplement est le fruit des interactions entre les individus d'un même point

de peuplement. Si $P_{creation}$ est la probabilité que l'interaction entre deux individus d'un même point de peuplement soit fructueuse, c'est-à-dire qu'elle amène à la création d'une innovation, et si N est le nombre d'interactions possibles au sein du point de peuplement, alors grâce à la loi Binomiale, la probabilité $\Pi_{m_{creation}}$ de l'apparition de $m_{creation}$ innovations issues de l'interaction fructueuse entre deux individus peut être calculée. On peut ainsi connaître la probabilité $\Pi_{m_{creation}>0}$ qu'au moins une innovation apparaisse au sein du point de peuplement :

$$\begin{aligned}\Pi_{m_{creation}>0} &= 1 - P_{m=0} \\ &= 1 - \left[\frac{N!}{0!(N-0)!} \cdot P_{creation}^0 \cdot (1 - P_{creation})^{N-0} \right] \\ &= 1 - (1 - P_{creation})^N\end{aligned}$$

Si la taille démographique du point de peuplement est P_t^i alors le nombre N d'interactions deux à deux possibles entre les individus de ce point de peuplement s'écrit (on considère que toutes les interactions entre deux individus sont symétriques) :

$$N = \frac{P_t^i \cdot (P_t^i - 1)}{2}$$

Grâce à cette approche, les interactions internes au point de peuplement n'ont pas besoin d'être explicitement simulées, et la probabilité de leur résultat, i.e. de l'apparition d'une innovation, est approchée par une loi statistique. Ainsi la notion d'innovation dans le modèle SimpopLocal regroupe à la fois le fait que deux individus pris au hasard aient un échange créatif et que cette création puisse se développer. Grâce à la loi Binomiale, la probabilité de l'acquisition d'innovations est fonction de la taille démographique du point de peuplement (c.f. figure 3.5) : plus la taille du point de peuplement est grande et plus forte est la probabilité d'innover. Ce mécanisme traduit donc bien l'effet recherché entre taille et probabilité d'innover.

Ce calcul ne fournit en réalité qu'un potentiel, une probabilité d'apparition d'au moins une innovation au sein d'un point de peuplement. Il faut y ajouter un mécanisme aléatoire utilisant cette probabilité pour matérialiser la possible apparition de l'innovation. Nous utilisons pour cela un mécanisme très couramment employé. À chaque pas de simulation, on calcule la probabilité d'apparition de l'innovation $\Pi_{m_{creation}>0}$ pour chaque point de peuplement, cette probabilité a donc une valeur comprise entre 0 et 1. Ensuite une valeur $P(i)$ comprise entre 0 et 1 est tirée au sort suivant une loi uniforme. Si $P(i) > \Pi$, alors l'innovation n'apparaît pas, mais si $P(i) < \Pi$ l'innovation est acquise par le point

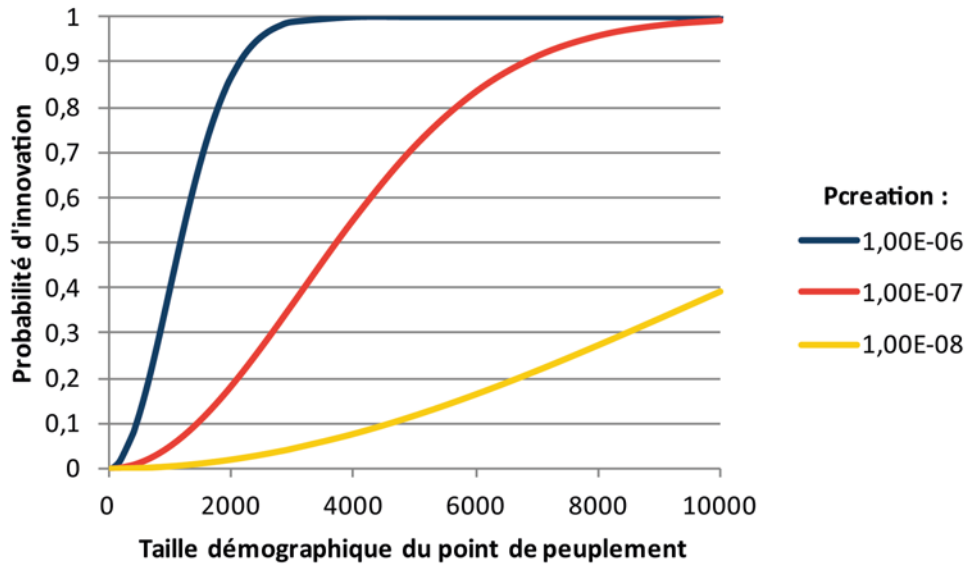


Figure 3.5 – Évolution de la probabilité d’apparition de l’innovation dans un point de peuplement en fonction de la taille démographique de ce point de peuplement et en fonction de trois valeurs possibles du paramètre $P_{creation}$

de peuplement : un nouvel agent innovation est généré avec trois identifiants (son identifiant propre iD , l’identifiant de l’innovation mère $rootId$ qui est donc le même que son identifiant propre et la date du pas de simulation actuel).

3.2.3.5 Le mécanisme de diffusion des innovations

Les points de peuplement sont en interaction suivant un réseau de relations entre points de peuplement, ce qui permet à leurs habitants de partager leurs innovations. Seuls deux points de peuplement directement connectés par le réseau de relations peuvent échanger des innovations. Dans notre modèle, cette circulation de l’information n’a pas de matérialisation autre qu’une loi statistique. Nous ne modélisons pas des migrations de populations ou des échanges commerciaux entre populations. Nous proposons de modéliser le résultat de cette diffusion suivant une loi statistique qui peut simplement s’interpréter comme le calcul de la probabilité de diffusion d’une innovation d’un point de peuplement à un autre en fonction du nombre possible de rencontres entre des personnes appartenant à ces deux points de peuplement. On peut de la sorte utiliser une nouvelle fois une loi Binomiale pour faire ce calcul de probabilité de diffusion d’innovation. Si $P_{diffusion}$ est la probabilité que l’interaction entre deux individus de points de peuplement différents aboutisse à la transmission d’une innovation, et K le nombre d’interactions possibles entre les deux points de peuplement, alors la probabilité $\Pi_{m_{diffusion} > 0}$ qu’au moins une innovation se transmette par diffusion entre les deux points de peuplement peut s’écrire :

$$\Pi_{m_{diffusion} > 0} = 1 - (1 - P_{diffusion})^K$$

Le nombre d'interactions possibles K entre les populations de deux points de peuplement dépend d'un potentiel d'interaction établi à partir de la taille de leur population et de la distance qui les sépare. On suppose que la diffusion d'une innovation se produit préférentiellement entre points de peuplement de grande taille : comme la taille est conditionnée par l'acquisition d'innovation, plus un point de peuplement est grand et plus il a pu développer son capital de compétences et de connaissance, il a donc une avance dans le processus d'adoption de l'innovation, ce qui augmente la probabilité d'accrochage de la nouveauté. On suppose cependant que la distance entre les peuplements va introduire un frein à la transmission. Ces deux hypothèses conduisent à la proposition d'un modèle de diffusion inspiré des modèles gravitaires. Ainsi le nombre K d'interactions possibles entre deux points de peuplement i et j est une fraction de leur population respective, qui décroît selon un facteur *DistanceDecay* avec la distance D_{ij} qui les sépare :

$$K = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_t^i \cdot P_t^j}{D_{ij}^{DistanceDecay}}$$

Comme pour le cas de l'apparition des innovations, ce mécanisme de diffusion de l'innovation ne fournit en réalité qu'une probabilité de diffusion d'une innovation entre deux points de peuplement. Nous devons donc aussi ajouter un mécanisme aléatoire utilisant cette probabilité pour matérialiser la possible diffusion de l'innovation, qui suit exactement le même protocole que pour le mécanisme de création d'innovation.

Pour chaque point de peuplement on interroge ainsi tous ses voisins suivant le réseau d'interactions pour tester si une diffusion d'innovation aura lieu ou non. Concrètement, le nombre maximum d'innovations pouvant être reçues par un point de peuplement lors d'un pas de simulation est égal au nombre de voisins directs qu'il présente. Cependant ces diffusions sont contrôlées pour éviter les redondances : il n'est pas possible pour un point de peuplement d'acquérir par diffusion plusieurs innovations qui ont le même *rootId*. Ce mécanisme permet de prévenir des acquisitions multiples d'une même innovation (c'est-à-dire provenant d'un même ancêtre commun), mais aussi dans le pire des cas d'éventuels effets *ping-pong* : deux voisins se re-transmettant, pas de simulation après pas de simulation, la même innovation. Par ailleurs, et dans l'optique d'un développement futur du modèle, ce contrôle pourrait aussi permettre de différencier qualitativement les innovations. Au sein du groupe formé par les voisins pour lesquels la diffusion a été testée de façon positive pour ce pas de simulation, on trie toutes leurs innovations en fonction de leur *rootId*. Au plus une innovation par voisin sélectionné et par *rootId* différent sera ensuite diffusée au point de peuplement initialisant ce test. Pour chaque innovation effectivement diffusée, un nouvel agent innovation est généré dans le point de peuplement qui acquiert l'innovation,

par clonage de l'agent innovation à l'origine de la diffusion. Cet agent cloné possède alors trois identifiants : un identifiant propre *iD*, l'identifiant de l'agent innovation mère *rootId* transmis par le clonage, et la date *date* du pas de simulation actuel. Le processus de diffusion tel qu'il est actuellement implémenté est décrit dans les diagrammes d'activités du modèle présentés dans la section 3.2.5.3.

3.2.3.6 Le mécanisme de durée de vie des innovations

Par ailleurs, un dernier mécanisme contrôle ce processus de diffusion des innovations. Chaque innovation acquise par un point de peuplement ne peut être transmise par diffusion que durant une période de temps *InnovationLife*, décomptée à partir du pas de simulation de leur acquisition et comptabilisée à partir de l'attribut *date*. Après cette période de temps, on considère que l'innovation est obsolète et qu'elle ne vaut plus la peine d'être transmise.

3.2.3.7 Note sur la modélisation de l'acquisition et de l'impact des innovations

L'hypothèse de l'impact décroissant de l'innovation permet de traduire le fait que ce processus d'acquisition d'innovation a un effet de moins en moins fort sur la richesse et la taille de la population. Cette hypothèse a été posée pour deux raisons principales : une première, théorique, et une seconde, technique. D'abord elle s'accorde avec l'idée d'une efficacité décroissante de l'amélioration des systèmes socio-économiques (principe de Ricardo d'effet décroissant) : plus le système a déjà été amélioré et optimisé et plus il est difficile d'y ajouter une amélioration significative à moins peut-être de changer radicalement de système. Par ailleurs, les mécanismes d'acquisition de l'innovation (par apparition et par diffusion) génèrent par une boucle de rétroaction positive un comportement d'*emballement* du système qu'il faut canaliser. La probabilité pour un point de peuplement d'acquérir une innovation est proportionnelle à sa taille. Or par sa répercussion sur les comportements de croissance, ce mécanisme est auto-catalytique : plus un point de peuplement acquiert d'innovations, plus les limites de sa croissance sont repoussées, plus sa taille augmente et donc plus il a de chance de développer une nouvelle innovation. Les premiers tests effectués sur une version du modèle sans effet décroissant de l'innovation, c'est-à-dire avec un impact homogène pour toutes les acquisitions, ont montré que le système présentait deux grands comportements : soit la probabilité de l'innovation était tellement faible que le système stagnait (pas d'innovation donc pas de croissance), soit, avec des valeurs un peu plus grandes de probabilité d'innovation, le système engendrait une faible croissance qui très rapidement s'emballait pour finalement faire imploser le système (avec des taux de croissance irréalistes et une explosion du nombre d'agents innovation qui faisait arrêter

brusquement le logiciel de simulation NetLogo). Ce phénomène est bien sûr un artefact des choix de modélisation, et plus spécialement de celui de la nature de l'innovation et de son impact sur la croissance, mais il pourrait aussi mettre en évidence la nécessité de la modélisation d'un autre processus pour engendrer des comportements de système plus représentatifs des évolutions spatio-temporelles des systèmes de peuplement. Peut-être qu'une méthode de paramétrage très fine, telle qu'on l'expose dans le chapitre suivant, appliquée à un modèle qui simulerait un impact homogène des innovations aurait permis de trouver des valeurs de paramétrage pouvant engendrer une dynamique plus réaliste. Mais à cette phase du projet, ce genre d'exercice n'était pas encore envisagé et nous avons donc fait le choix de contrôler la boucle générale de rétro-action positive et l'emballement qu'elle générerait par la mise en place d'un autre mécanisme. Dans la version du modèle SimpopLocal que nous présentons ici, la croissance d'un point de peuplement est limitée à une valeur maximale qu'il ne peut en aucun cas dépasser. Ce plafonnement, imposé par une quantité finie de ressources, peut être justifié par le fait qu'un point de peuplement ne peut pas dépasser les capacités technico-écologiques du territoire qu'il occupe, c'est-à-dire sa capacité d'accueil optimale.

3.2.3.8 Note sur le nombre total d'agents innovation

Malgré l'effet décroissant de l'impact de l'acquisition d'une innovation sur la croissance (c.f. 3.2.3.7), l'effet de la boucle de rétro-action positive entre taille démographique et acquisition d'innovation génère un nombre croissant d'agents innovation au cours de la simulation. Un trop grand nombre d'agents ralentit pourtant de façon drastique son déroulement. Pour éviter de tomber dans ce biais très gênant lors de l'expérimentation, il est envisageable d'arrêter la simulation lorsqu'un seuil maximal d'agents a été créé par la dynamique de la simulation. Nous avons donc décidé d'arrêter toutes les simulations qui dépasseraient plus de 10000 agents innovation générés. Ce chiffre correspond globalement au nombre d'innovations qui engendre des temps de simulation beaucoup trop longs pour être acceptables. Cela peut sembler arbitraire d'un point de vue thématique, pourtant ce chiffre permet de donner une ordre de grandeur aux innovations. Ce nouveau paramètre, que nous appelons *MaxInnovations*, qui définit le nombre maximum d'innovations pouvant être générées pendant une période de temps (le temps total de la simulation), s'associe au paramètre d'impact d'une innovation *InnovationImpact*, pour donner une définition beaucoup plus précise de la notion d'innovation employée dans le modèle. Si des données empiriques permettaient de fixer deux de ces trois variables (*MaxInnovations*, *InnovationImpact* ou le temps total de la simulation), alors il serait possible d'estimer la valeur de la troisième variable grâce au calibrage du modèle. Malheureusement, ce type de données aussi globales et sur des périodes de temps si longues manquent pour se livrer à cet exercice.

3.2.3.9 Le mécanisme de catastrophes

Comme nous l'avons évoqué en section 3.2.2, la dynamique du système de peuplement que simule *SimpopLocal* se caractérise aussi par une grande vulnérabilité aux aléas qui pèsent sur l'évolution des ressources et sur celle de la population : catastrophes naturelles (accidents climatiques, séismes), épidémies ou épizooties, ou encore conflits entre groupes voisins, sont susceptibles à tout moment de détruire tout ou partie de la population et de leurs richesses. Nous ne simulons pas explicitement ou qualitativement ces épisodes mais les résumons sous une forme probabilisée et uniforme de destruction massive du point de peuplement touché. À chaque pas de temps et pour chaque point de peuplement, on tire au sort la catastrophe qui a une probabilité $P_{catastrophe}$ d'avoir lieu. Ces tirages aléatoires sont indépendants et peuvent être assimilés au processus de Bernoulli. Nous utilisons pour cela le même truchement de formalisation informatique que pour les tirages aléatoires des mécanismes d'innovation. Une valeur $P(c)$ comprise entre 0 et 1 est tirée au sort suivant une loi uniforme. Si $P(c) > P_{catastrophe}$, alors la catastrophe n'a pas lieu, mais si $P(c) < P_{catastrophe}$ alors une catastrophe touche le point de peuplement testé : sa population et ses ressources disponibles sont re-initialisées à des valeurs prises respectivement par les paramètres $Pop_{Catastrophe}$ et $R_{Catastrophe}$. Ces deux paramètres restent fixes durant toute la simulation, quelque soit le point de peuplement considéré.

3.2.4 Les formalismes d'implémentation du modèle *SimpopLocal*

Ce modèle a originellement été développé sous NetLogo⁷ lors des premiers prototypes. C'est durant cette phase que les principales règles et les principaux mécanismes du modèle ont été adoptés : forme des entités, structure des mécanismes, etc. Cependant la mise en œuvre de la démarche d'exploration massive des dynamiques du modèle telle que nous l'avons proposée dans le chapitre 2 a nécessité sa retranscription dans un autre langage informatique : Scala⁸. En plus de l'adapter à un protocole d'exploration que nous détaillerons dans le prochain chapitre, cette réplique du modèle a permis de largement le déboguer mais aussi de réduire significativement (d'un facteur 20 environ) les temps de simulation. Le code du modèle *SimpopLocal* dans sa version scala est commenté et disponible en ligne à l'adresse <http://iscpif.github.io/simpoplocal-epb/>. Cette transcription du code a été réalisée par Romain Reuillon et Sébastien Rey Coyrehourcq.

7. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

8. <http://www.scala-lang.org/>

Paramètre	Description
R_{max}	La capacité d'accueil maximale pour chaque point de peuplement (exprimée en nombre d'habitants)
r_{growth}	La constante de croissance du modèle de Verhulst (exprimée comme un taux de croissance annuel)
$InnovationImpact$	L'impact général des innovations sur la quantité de ressources disponibles
$P_{creation}$	La probabilité de l'apparition d'une innovation lors de l'interaction entre deux individus d'un même point de peuplement
$P_{diffusion}$	La probabilité de la transmission de l'innovation lors de l'interaction entre deux individus de points de peuplement différents
$DistanceDecay$	L'effet de la distance sur la diffusion des innovations
$InnovationLife$	La durée de vie de l'innovation durant laquelle elle peut être diffusée
$MaxInnovation$	Le nombre total d'agents innovation pouvant être générés avant l'arrêt de la simulation
$P_{catastrophe}$	La probabilité de l'occurrence d'une catastrophe en un point de peuplement à chaque pas de simulation
$Pop_{Catastrophe}$	La valeur de ré-initialisation de la population d'un point de peuplement touché par une catastrophe
$R_{Catastrophe}$	La valeur de ré-initialisation des ressources disponibles d'un point de peuplement touché par une catastrophe

Tableau 3.1 – Les paramètres d'état du modèle SimpopLocal

3.2.5 Déroulement d'une simulation (*Design Concept*)

3.2.5.1 L'initialisation

Un grand nombre de paramètres sont à déterminer lors de l'initialisation du modèle SimpopLocal. L'initialisation se décompose en deux grands types de paramétrage :

- d'un coté la définition des valeurs des *paramètres d'état* : l'ensemble des paramètres d'état à initialiser sont résumés dans le tableau 3.1.
- et de l'autre, le paramétrage des agents présents à l'initialisation du modèle : les points de peuplements avec leurs trois paramètres $((x, y), P_{t=0}^i$ et $R_{M=0}^i)$ et la configuration réseau des relations qu'ils entretiennent.

Nous avons choisi de définir et de conserver une unique configuration initiale des agents point de peuplement pour l'ensemble des expérimentations que nous présentons dans cette thèse. Les distributions log-normales des tailles de points de peuplement et la théorie des lieux centraux (CHRISTALLER, 1933) sont des modèles utilisés par les archéologues pour décrire leurs données spatiales (JOHNSON, 1977 ; DURAND-DASTÈS et al., 1998 ; GARMY, 2009 ; SANDERS, 2012) y compris pour les sites des périodes néolithiques pré-urbaines (LIU, 1996). La configuration initiale que nous avons choisie de conserver pour toutes les expérimentations a donc été définie suivant des règles assurant une bonne représentativité des structures communes des systèmes de peuplement :

- une distribution log-normale des tailles démographiques des points de peuplement (100 points de peuplement dont les tailles démographiques, qui ont été générées de façon aléatoire, varient entre 38 et 133 habitants) ;
- une répartition spatiale suivant une distribution pseudo-christallérienne (il existe des distances minimales d'espacement entre catégories de taille de points de peuplement, les plus grands points de peuplement sont plus éloignés entre eux que les plus petits points de peuplement) ;
- un réseau de liens entre points de peuplement qui conserve la même logique hiérarchique chritallérienne (les petits points de peuplement établissent des connexions à plus faible distance que les grands points de peuplement).

Nous décrivons en détails dans l'annexe C les mécanismes qui ont permis de générer une telle situation initiale. À l'initialisation, la population est considérée à l'équilibre avec les ressources disponibles. Par conséquent, les ressources disponibles initiales sont égales à la population initiale. La figure 3.6 donne une représentation graphique de cette situation initiale⁹.

3.2.5.2 Les conditions d'arrêt

Les conditions d'arrêt sont à déterminer en fonction du type de simulation recherché. Plusieurs types de conditions peuvent être envisagés :

- *Arrêt de la simulation au bout d'un nombre pré-défini de pas de simulation* : lors des expérimentations présentées dans la suite de cette thèse, les simulation sont arrêtées au bout de 4000 pas de simulation. Cette condition d'arrêt émane de l'expérimentation que nous avons menée pour le calibrage de SimpopLocal. Elle est discutée dans le chapitre suivant au sein duquel cette expérimentation est présentée.

9. Cette configuration initiale est retranscrite dans un fichier `.txt` qui est chargé à chaque initialisation du modèle. Ce fichier d'initialisation est disponible en ligne : <http://iscpif.github.io/simpopllocal-epb/>.

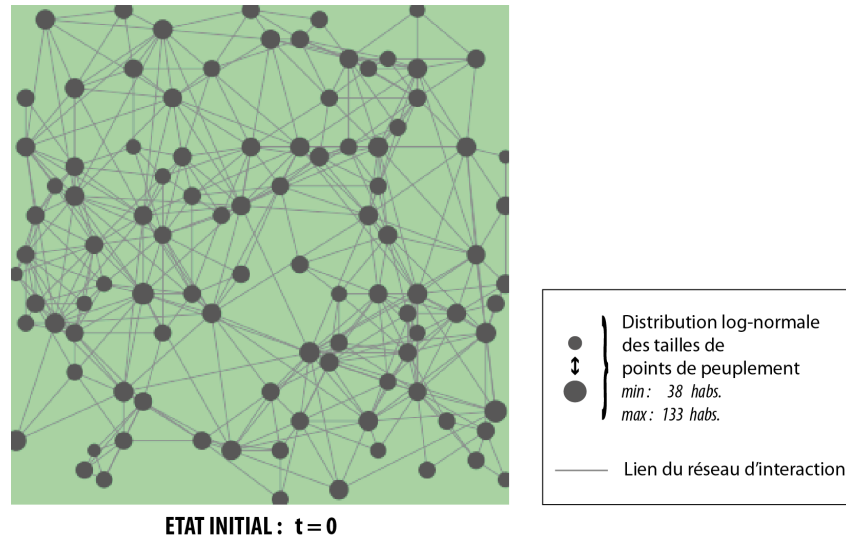


Figure 3.6 – Configuration initiale déterminée pour toutes les séries d’expérimentation sur le modèle SimpopLocal

- *Arrêt de la simulation lorsqu’un seuil de taille de population est atteint* : soit par un seul point de peuplement, soit par l’ensemble du système de peuplement.
- *Arrêt de la simulation lorsqu’un nombre pré-défini d’agents innovation ont été générés* : dans la section 3.2.3.8 nous avons expliqué que 10000 agents innovation étaient la limite pour ne pas trop ralentir les temps de calcul.

3.2.5.3 Déroulement d’un pas de simulation

Le déroulement d’un pas de simulation est décrit par des diagrammes d’activité : le diagramme de la figure 3.7 donne le déroulement général d’un pas de simulation, les diagrammes des figures 3.8 et 3.9 précisent certaines étapes moins explicites de ce déroulement général. Pour plus de détail, le lecteur peut se reporter au code source largement commenté du modèle, disponible en ligne à l’adresse <http://iscpif.github.io/simpoplocal-epb/>.

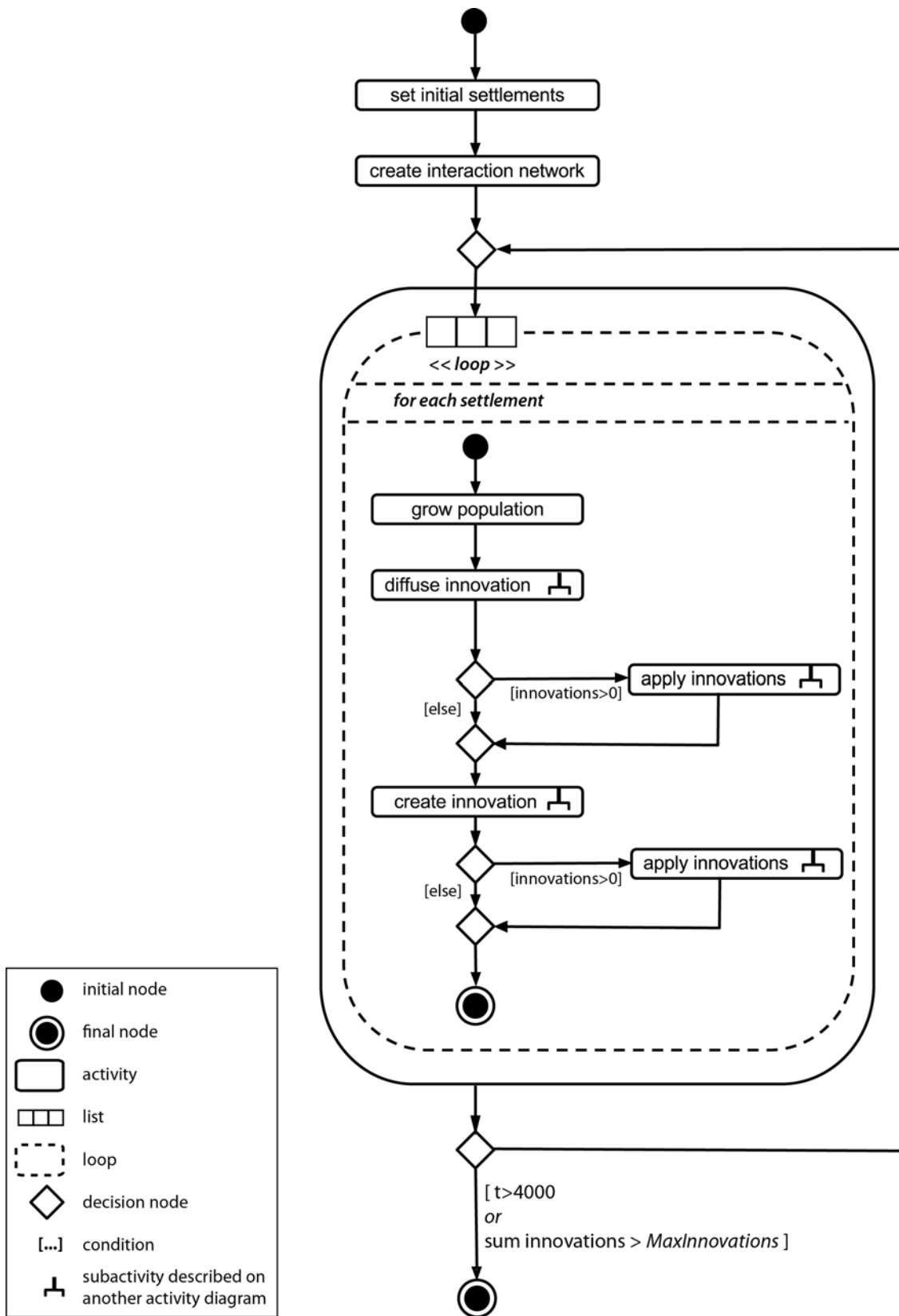


Figure 3.7 – Diagramme général d'activité du modèle SimpopLocal

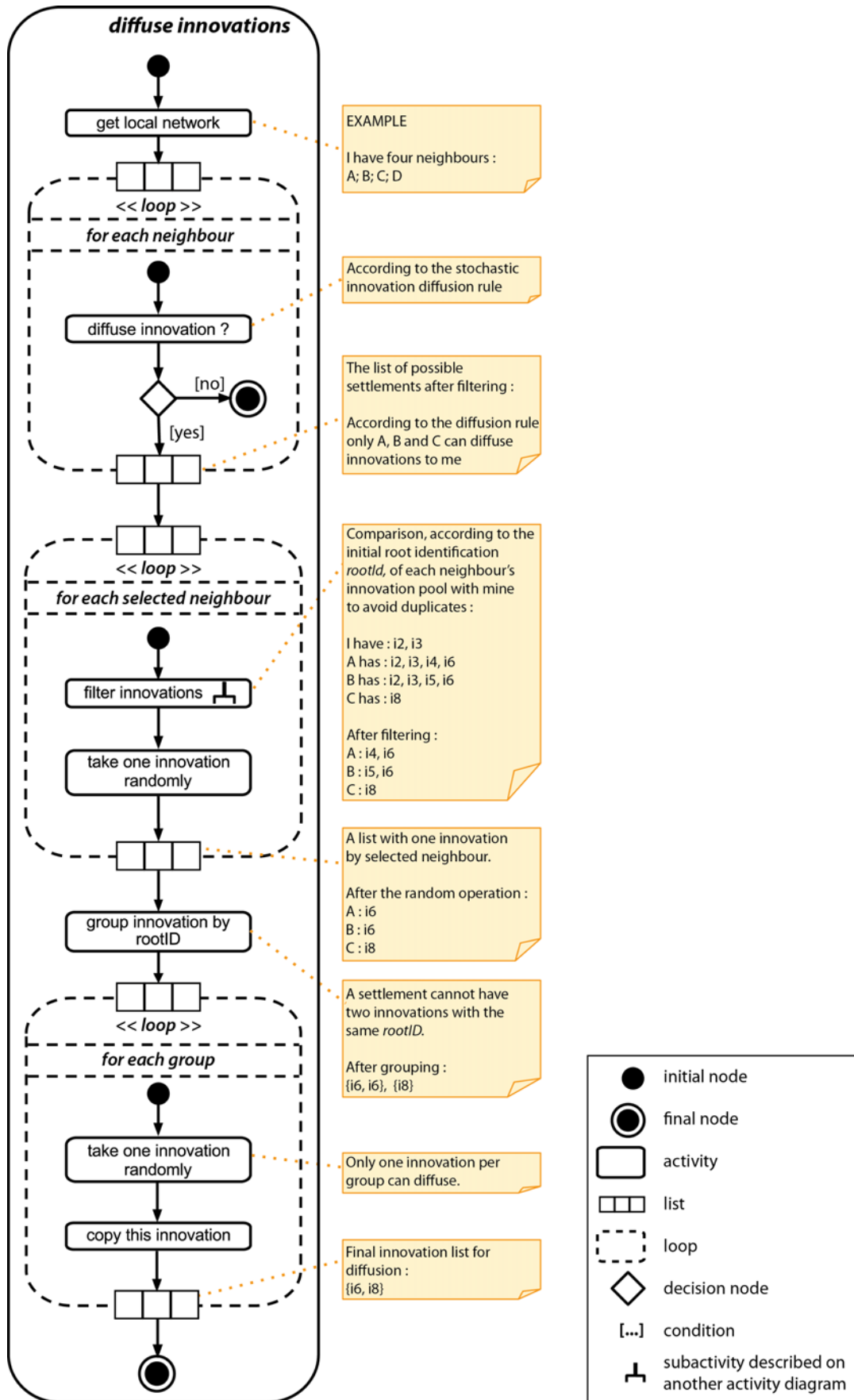


Figure 3.8 – Diagramme d'activité complémentaire (A) du modèle SimpopLocal

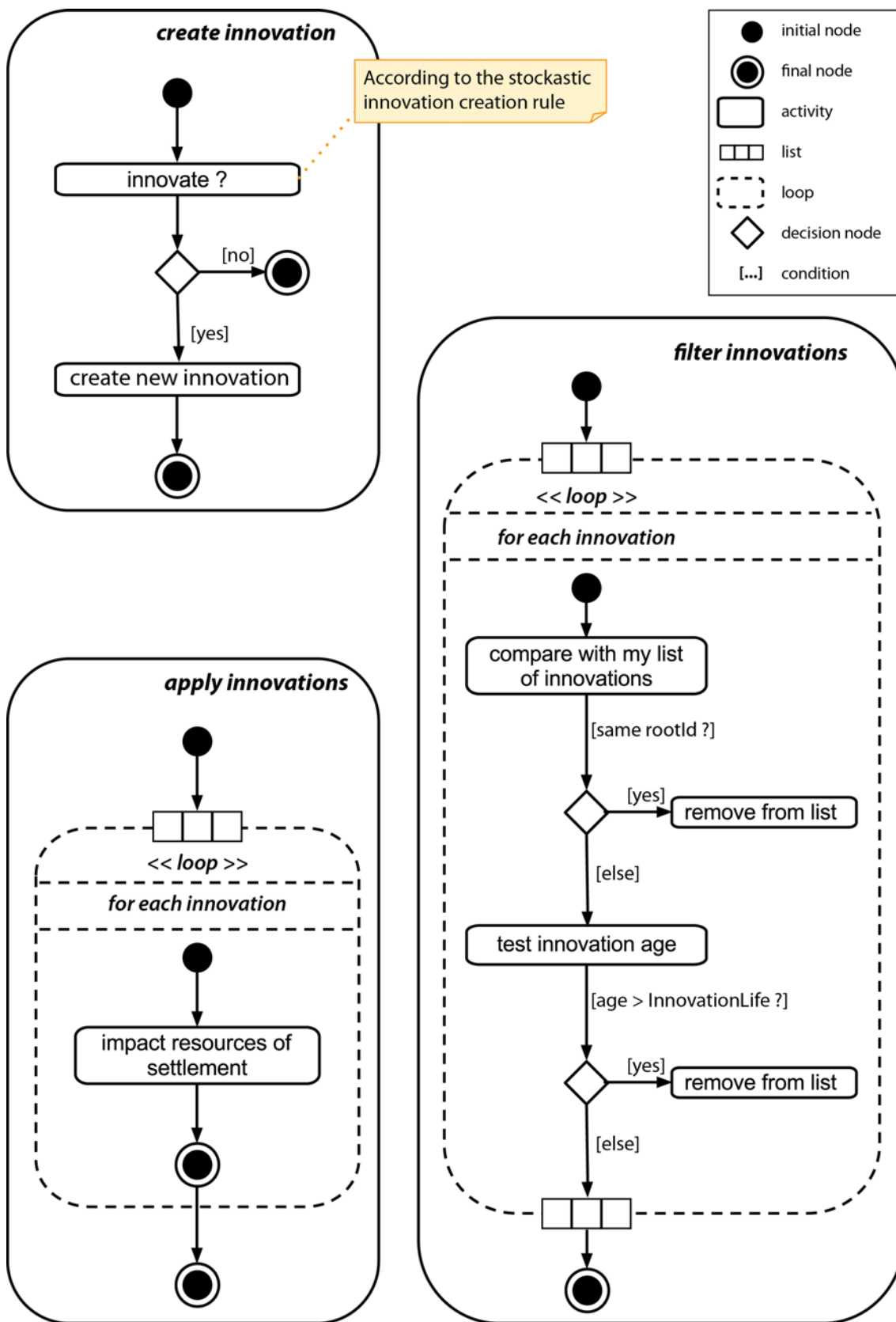


Figure 3.9 – Diagramme d'activité complémentaire (B) du modèle SimpopLocal

Conclusion : SimpopLocal, un modèle à évaluer pour des applications futures

Nous avons présenté dans ce troisième chapitre un modèle de hiérarchisation d'un système de peuplement. Ce modèle a la particularité d'être très épuré par rapport aux autres modèles Simpop auxquels il est affilié. Tout en restant représentatif des hypothèses de la théorie évolutive urbaine, le nombre de mécanismes, de règles et de paramètres sont nettement réduits : le tableau 3.1 comporte 11 paramètres clés pour le modèle SimpopLocal, alors que les autres modèles Simpop et SIMPOP2 peuvent en compter plus d'une cinquantaine. Pour ce faire, le modèle ne distingue plus qualitativement les "fonctions urbaines" successives durant l'évolution des systèmes urbains mais les transpose en un processus abstrait d'innovation. Le processus d'apparition de ces innovations est endogénéisé dans la dynamique du modèle, alors que dans les autres modèles Simpop il était encore géré de façon exogène. Cette simplification permet une meilleure connaissance des comportements du modèle, par le biais de son exploration intensive. En effet, bien qu'il soit une application simplifiée du paradigme de modélisation Simpop, les comportements simulés traduisent tout de même une complexité qu'il est nécessaire d'explorer. Ces explorations permettront dans un premier temps de tester si les mécanismes qui sont proposés sont effectivement capables de générer les dynamiques de hiérarchisation de système recherchées. Dans un deuxième temps, ces explorations mettront en évidence le rôle de chaque mécanisme implémenté et son apport dans les dynamiques simulées. Le chapitre suivant présente les protocoles d'exploration que nous avons mis en place pour le modèle SimpopLocal et les principaux résultats qui en découlent.

Ces premières évaluations des mécanismes seront utiles pour les prochaines versions et applications de SimpopLocal. Si ce modèle est trop simplifié pour être complètement conforme aux systèmes de peuplement réels actuels ou anciens dans cette première version épurée, les concepts à l'origine des processus simulés peuvent trouver écho dans certains contextes (les villes proto-historiques par exemple) ou théories archéologiques comme la théorie "*Peer polity interaction*". Ces théories ou ces contextes archéologiques pourront ainsi être approchés d'une manière innovante grâce à des amendements au modèle. CHERRY (2005) donne un résumé de la théorie "*Peer polity interaction*", définie par RENFREW (1975) ; RENFREW et CHERRY (1986). Dans son article, C. Renfrew remarquait combien il était courant que les premiers petits états naissent non pas isolément mais en *cluster*, avec des similarités fortes en termes de taille, de structure sociale, de culture matérielle, etc. Il observa aussi que les entités politiques comparables en taille et en organisation (comme les premières formes d'États) avaient tendance à se retrouver dans les mêmes régions et à évoluer simultanément. De plus, les données archéologiques indiquent que ces tendances de changements n'émanaient pas d'une seule source d'innovation, mais

émergeaient de façon contemporaine dans plusieurs unités interagissant. Cette théorie suggère donc que le mécanisme sous-jacent à ces remarquables observations est l'échange et place les processus d'interaction au centre des mécanismes du changement social. Le modèle SimpopLocal, qui fonde aussi sa dynamique sur les interactions sociales, pourrait servir de noyau à la construction d'un modèle testant cette théorie par la simulation.

Exploration de modèle : un protocole assisté par le calcul intensif

"Une critique récurrente faite aux modèles multi-agents porte sur leur "validation". Il est ainsi fréquent, lors de l'exposé d'un modèle, que la question de la validation, qui se veut la question piège dans ce domaine, soit posée, plongeant le conférencier dans un embarras bien visible."

F. Amblard, J. Ruchier, P. Bommel, 2006

4.1	Calibrage du modèle SimpopLocal par des algorithmes évolutionnaires	181
4.1.1	Les enjeux du calibrage de SimpopLocal	181
4.1.1.1	Des paramètres à calibrer pour simuler des comportements ciblés	182
4.1.1.2	Des techniques usuelles de calibrage impossibles à mettre en œuvre	185
4.1.2	Une méthode de calibrage automatique	188
4.1.2.1	Le calibrage comme un problème d'optimisation . .	188
4.1.2.2	L'utilisation d'algorithmes évolutionnaires	188
4.1.2.3	Une exploration de l'espace de paramétrage guidée par trois objectifs de calibrage qui prennent en compte la stochasticité du modèle	190
4.1.2.4	La spécificité des explorations par optimisation multi-objectif	194

4.1.2.5	Le recours au calcul massivement distribué	195
4.1.3	Analyse des résultats de l'exploration guidée et automatisée pour le calibrage de SimpopLocal	198
4.1.3.1	La convergence de l'algorithme évolutionnaire pour la proposition de jeux de valeurs de paramètres can- didats au calibrage	198
4.1.3.2	Sélection des meilleurs paramétrages et discussion des valeurs proposées	199
4.1.4	Une méthode de calibrage efficace	206
4.2	Interprétation des comportements du modèle SimpopLocal	208
4.2.1	Illustrations de sorties d'une simulation à l'échelle du système de peuplement	208
4.2.2	Illustrations de sorties d'une simulation à l'échelle des points de peuplement	213
4.3	Une analyse de sensibilité innovante (<i>EP algorithm</i>)	217
4.3.1	L'utilisation d'algorithmes d'optimisation pour l'exploration globale de modèles multi-agents	217
4.3.1.1	L'exploration des comportements des modèles multi- agents	217
4.3.1.2	Une vue globale de l'espace de paramétrage	218
4.3.1.3	L'algorithme des profils d'exploration (<i>EP algorithm</i>)	219
4.3.2	Les profils de calibrage de six paramètres du modèle SimpopLocal	220
4.3.2.1	Application de la méthode au modèle SimpopLocal	220
4.3.2.2	Le paramètre r_{growth}	222
4.3.2.3	Le paramètre <i>InnovationLife</i>	224
4.3.2.4	Le paramètre R_{max}	225
4.3.2.5	Le paramètre <i>InnovationImpact</i>	226
4.3.2.6	Le paramètre $P_{creation}$	228
4.3.2.7	Le paramètre $P_{diffusion}$	229
4.3.2.8	Le paramètre <i>DistanceDecay</i>	232
4.3.3	L'apport de la méthode d'exploration des comportements de modèles par les profils de calibrage	233

Introduction : l'évaluation d'un modèle de simulation multi-agent

Les modèles géographiques de simulation de systèmes de villes, tels que les modèles de la famille Simpop, sont fondés sur l'hypothèse que les interactions des entités du niveau micro-géographique peuvent engendrer une dynamique stylisée au niveau du système d'entités. Ce fait constitue une des caractéristiques récurrentes des systèmes complexes (PUMAIN et SANDERS, 2013). L'hétérogénéité et le grand nombre de scénarios d'implémentation possibles pour représenter ces processus, la description des mécanismes au niveau micro-géographique, la non-linéarité des interactions, la diversité des formes de relation spatiale et l'importance du contexte historique sont autant de raisons qui conduisent régulièrement les géographes à utiliser les modèles multi-agents comme support de réflexion et d'expérimentation (BATTY, 2008 ; CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008 ; HEPPESTALL, CROOKS et al., 2011 ; SANDERS, 2007). L'enjeu des modèles géographiques multi-agents est d'assembler un faisceau de mécanismes adaptés au niveau de résolution de la question théorique à l'origine du modèle et d'évaluer avec un certain degré de confiance la capacité du modèle à répondre à ce problème (SARGENT, 2005).

Dans la plupart des cas, cette évaluation nécessite une étape de calibrage (BALCI, 1998), pendant laquelle la capacité du modèle à reproduire une structure ou une dynamique cible est évaluée. Cette phase de calibrage est généralement conduite de façon manuelle, par essais-erreurs. Cette méthode de calibrage manuel est très laborieuse car du fait de la non linéarité des processus, chaque incrément dans la valeur d'un paramètre est susceptible de produire une bifurcation en sens inverse de l'évolution recherchée. En outre, selon cette méthode, il est impossible de déterminer si les valeurs de paramétrage finalement obtenues sont les meilleures estimations possibles, ou si elles correspondent simplement à l'existence d'un optimum local dans l'espace défini par l'ensemble des comportements du modèle. Il est donc apparu crucial d'automatiser le processus de calibration. Les méthodes proposées dans ce chapitre permettent ainsi de substituer temporairement au regard expert sur le modèle une expertise automatisée. Cette automatisation requiert une transposition quantitative du processus d'évaluation de résultats de simulation mené par l'expert.

Pour mener à bien cette automatisation, des méthodes et des outils d'exploration de modèles multi-agents ont été développés et implémentés. Ils s'appuient sur des algorithmes et des techniques d'optimisation qui guident la recherche pour une exploration *efficace* de l'espace de paramétrage du modèle. Mais l'automatisation du calibrage repose sur des explorations massives de l'espace de paramétrage du modèle qui étaient jusqu'alors impossibles à mener à bien avec les techniques usuelles. Le logiciel OpenMOLE (REUILLON, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ, 2013) permet d'orchestrer la distribution de l'effort

computationnel sur grilles de calcul et fait de l’exploration massive l’une de ses fonctionnalités majeures. Les méthodes et les outils d’exploration de modèle multi-agents ainsi développés grâce à OpenMOLE sont maintenant totalement opérationnels, réutilisables et applicables à d’autres modèles grâce à la plateforme SimProcess (REY COYREHOURCQ, 2014).

La première section de ce chapitre présente et détaille la méthode d’exploration de modèle multi-agents qui a été développée pour résoudre le problème de calibrage du modèle SimpopLocal (section 4.1). Cette expérimentation repose sur l’utilisation d’algorithmes évolutionnaires. Dans cette expérimentation, l’exploration de l’espace de paramétrage est guidée par des objectifs de calibrage qui sont définis pour donner une traduction quantitative des comportements de simulation recherchés. La deuxième section de ce chapitre illustre les principaux résultats marquants d’une simulation du modèle SimpopLocal calibré (section 4.2). Les résultats, qui détaillent des comportements du modèle à l’échelle du système mais aussi à l’échelle des points de peuplement, sont très satisfaisants et prouvent la capacité du modèle à reproduire des évolutions plausibles de systèmes de peuplement.

Le calibrage apporte une information cruciale pour l’évaluation et l’utilisation du modèle, qui permet de conclure quant à sa capacité (ou non) à engendrer les comportements attendus. Néanmoins, il ne permet d’entrevoir qu’une infime partie des comportements possibles du modèle. La troisième section de ce chapitre (section 4.3) propose une deuxième méthode, dérivée de la première, pour identifier les conditions suffisantes et nécessaires du calibrage du modèle. Cette méthode constitue une avancée dans le processus d’évaluation du modèle en ce qu’elle permet d’identifier le rôle de chaque mécanisme dans la génération des comportements recherchés par la modélisation.

4.1 Calibrage du modèle SimpopLocal par des algorithmes évolutionnaires

4.1.1 Les enjeux du calibrage de SimpopLocal

Le modèle SimpopLocal (c.f. section 3.2) est conçu pour simuler l'émergence d'un système de villes, hiérarchisé et différencié, à partir d'un semis initial de villages beaucoup plus homogène.

"C'est cette émergence que Childe (1950) a appelé la *révolution urbaine* et elle se situe vers -3500/-3000 avant notre ère. Pour Childe le contraste est évident entre ce qu'il appelle les village de l'époque néolithique et les premières villes du Moyen-Orient. Dans le premier cas, il s'agit de *villages* comportant en moyenne 16-30 maisons et quelque 200-400 habitants et où l'artisanat restait rudimentaire. Dans le second cas, on est en présence de *villes* de 7000 à 20000 habitants comportant un artisanat élaboré et des formes évoluées d'organisation sociale et de gouvernements."

(BAIROCH, 1985, p.30)

"Rares sont les régions où, 2000 ans après l'existence d'une véritable agriculture, on ne constate pas l'apparition des villes."

(BAIROCH, 1985, p.130)

Ces citations sont le point de départ du calibrage du modèle SimpopLocal. Le calibrage d'un modèle est une procédure qui cherche à minimiser la différence entre un comportement simulé par le modèle et un comportement recherché ou attendu, c'est-à-dire un comportement défini à partir d'observations ou à partir de connaissances expertes. Comme le modèle SimpopLocal est très générique, il est difficile de se rattacher à une situation ayant pu être observée en archéologie. Le grand récit historique que nous offre BAIROCH (1985) nous permet d'extraire un ensemble de conditions caractéristiques de l'émergence des premières villes et donne un cadre général pour cibler les dynamiques de système que le modèle devrait produire. Nous cherchons donc, avec le calibrage du modèle, à nous rapprocher de la situation décrite par P. Bairoch. Dans ces citations, P. Bairoch donne des indicateurs précieux dont les ordres de grandeur sont globalement retrouvés dans beaucoup de travaux empiriques (HUOT, THALMANN et VALBELLE, 1990 ; MARCUS et SABLOFF, 2008). D'une organisation initiale en villages de quelques centaines d'habitants, le système de peuplement évolue vers une organisation de type urbain avec des *villes* pouvant atteindre 7000 à 20000 habitants. Cette évolution se déroule sur quelques milliers d'années, à partir de l'apparition de l'agriculture dans le système. Ce repère temporel est cependant très vague : comment P. Bairoch définit-il l'*existence d'une véritable*

agriculture? Pour contourner ce problème et englober plus largement cette transition, nous avons choisi de simuler l'évolution du système sur une période plus longue, en partant d'une situation initiale antérieure à l'émergence : notre système de peuplement est plus petit, avec des points de peuplement (sous ce terme nous rassemblons les villages initiaux et les villes qui en procèdent) d'une taille maximale d'une centaine d'habitants (c.f. section 3.2.5). Le critère que nous nous sommes fixé pour le calibrage du modèle SimpopLocal est de produire des simulations qui font évoluer ce système de peuplement sur une période de 4000 ans, faisant croître la population des points de peuplements d'une centaine d'habitants jusqu'à l'émergence d'un ensemble de villes dont l'une doit approcher 10000 habitants. Cette évolution n'a peut-être pas l'avantage de correspondre à l'évolution historique d'un système de peuplement observée, mais caractérise une évolution plausible, possible (compte tenu des simplifications du modèle) qui nous permet de déterminer si le modèle est capable d'engendrer des dynamiques *réalistes*, semblables dans leurs grandes lignes à celles qui peuvent être observées dans les systèmes de différentes régions du monde.

En effet, cette étape spécifique de calibrage est réalisée dans le but de prouver qu'il est bien possible d'engendrer une croissance de système de peuplement satisfaisante à partir des mécanismes implémentés. Dans cette perspective, nous avons fait le choix de ne conserver dans un premier temps que les mécanismes générateurs centraux. Nous avons donc choisi de travailler sur une version du modèle SimpopLocal où le mécanisme de catastrophes ne serait pas activé, c'est-à-dire sans introduire de bouleversements dans le système simulé.

4.1.1.1 Des paramètres à calibrer pour simuler des comportements ciblés

SimpopLocal dépend d'un nombre restreint de paramètres, moins d'une dizaine en tout, qu'il s'agit d'estimer pour calibrer le modèle. En effet, certains paramètres du modèle peuvent être fixés avec une assez grande certitude grâce aux connaissances et aux données empiriques, alors que d'autres sont très difficiles à estimer *a priori*. Comme nous l'avons vu dans la section 3.2.5, les paramètres relatifs à la distribution spatiale initiale des points de peuplement ont été fixés d'emblée, à des valeurs représentatives de la distribution statistique et de la répartition spatiale des systèmes de peuplement pré-urbains. Une distribution log-normale de la population, une répartition spatiale pseudo-christallérienne, mais aussi une taille moyenne des points de peuplement ont ainsi été choisies et engendrées pour créer une situation initiale *aléatoire* mais conforme aux connaissances archéologiques dans ses ordres de grandeur.

Par ailleurs, l'ordre de grandeur d'un autre paramètre peut aussi être estimé de façon empirique. D'après plusieurs travaux, une croissance annuelle moyenne de 0,02% est

représentative de la croissance des points de peuplement sédentaires et agricoles des périodes néolithiques (BAIROCH, 1985 ; RENFREW et POSTON, 1979). Comme nous l'avons vu dans la section 3.2.3.1, la fonction de croissance des points de peuplement ne permet pas de convertir cette connaissance empirique en une valeur de paramètre puisque le paramètre r_{growth} dans l'équation de croissance de Verhulst représente un taux de croissance maximal par pas de simulation qui ne peut être atteint que lorsque la taille de la population est très faible au regard du facteur limitant R de la croissance. Par conséquent, si ce paramètre est fixé à 0,02% et que les facteurs limitant R de chaque point de peuplement sont souvent atteints (ce qui est le cas pour les simulations de SimpopLocal), la croissance annuelle simulée sera toujours nettement inférieure à 0,02%. Aussi, pour pouvoir insuffler au système de peuplement simulé une dynamique de croissance sur toute la durée de la simulation qui soit de l'ordre de grandeur d'un taux moyen annuel de croissance de 0,02%, nous faisons l'hypothèse que le paramètre r_{growth} doit être fixé à une valeur beaucoup plus grande, d'au moins deux ordres de grandeur supérieur¹. Nous avons donc choisi de fixer r_{growth} à 2%.

Plusieurs autres paramètres ne peuvent pas être estimés à partir des données empiriques. Parmi eux, deux ont été fixés pour des raisons techniques. Le paramètre de durée de vie d'une innovation *InnovationLife* a été fixé à 4000 pas de simulation ce qui rend cette règle de simulation inopérante² : la durée de vie d'une innovation est aussi longue que la durée totale d'une simulation. Comme nous l'avons justifié dans la section 3.2.3.8, nous avons aussi choisi de fixer *MaxInnovation*, le nombre total d'innovations, à 10000 pour des raisons techniques (temps de simulation) et théoriques (calibrer la notion d'innovation). Cinq paramètres restent donc à estimer : R_{max} , *InnovationImpact*, $P_{creation}$, $P_{diffusion}$ et *DistanceDecay*. Le tableau 4.1 donne un état des lieux du paramétrage du modèle avant son calibrage. Il détaille les paramètres fixés et les bornes du domaine continu de paramétrage possible pour les paramètres non encore calibrés.

Par ailleurs, deux conditions d'arrêt d'une simulation peuvent être déduites de l'enjeu de calibrage et des conditions de paramétrage du modèle SimpopLocal :

- une simulation s'arrête au bout de 4000 pas de simulation (i.e. 4000 années simulées, un pas de simulation représentant 1 an) ;

1. L'expérimentation que nous développons dans la troisième partie (c.f. section 4.3) a prouvé que notre hypothèse était juste. L'ordre de grandeur de ce paramètre r_{growth} doit être nettement supérieur à l'ordre de grandeur de la croissance du système qui est recherchée. Les résultats de simulation du modèle calibré (c.f. section 4.2) montrent d'ailleurs que le taux de croissance moyen annuel effectivement simulé est de 0,36%, avec un r_{growth} fixé à 2%.

2. Les premiers essais de calibrage suivant la technique que nous développons dans cette partie ont montrés que ce mécanisme avait un effet très limité sur les comportements du modèle et les sorties de simulation. L'expérimentation que nous développons dans la troisième partie (c.f. section 4.3) permet de montrer cet effet et de justifier le choix de rendre le mécanisme inopérant.

Paramètre	Description	Paramétrage ou Bornes du domaine de paramétrage possible
R_{max}	la capacité d'accueil maximale pour chaque point de peuplement (exprimée en nombre d'habitants)	[1 ; 40000] (à estimer par calibrage automatique)
r_{growth}	la constante de croissance du modèle de Verhulst (exprimée comme un taux de croissance annuel)	2% (estimation d'après données empiriques)
$InnovationImpact$	l'impact général des innovations sur la quantité de ressources disponibles	[0 ; 2] (à estimer par calibrage automatique)
$P_{creation}$	la probabilité de l'apparition d'une innovation lors de l'interaction entre deux individus d'un même point de peuplement	[0 ; 1] (à estimer par calibrage automatique)
$P_{diffusion}$	la probabilité de la transmission de l'innovation lors de l'interaction entre deux individus de points de peuplement différents	[0 ; 1] (à estimer par calibrage automatique)
$DistanceDecay$	l'effet de la distance sur la diffusion des innovations	[0 ; 4] (à estimer par calibrage automatique)
$InnovationLife$	la durée de vie de l'innovation durant laquelle elle peut être diffusée (en pas de simulation)	4000 (mécanisme inactif)
$MaxInnovation$	le nombre total d'agents innovation pouvant être générés avant arrêt de la simulation	10000 (choix de modélisation)
$P_{catastrophe}$	la probabilité de l'occurrence d'une catastrophe en un point de peuplement à un pas de simulation	mécanisme inactif
$PopCatastrophe$	la valeur de ré-initialisation de la population d'un point de peuplement touché par une catastrophe	mécanisme inactif
$R_{Catastrophe}$	la valeur de ré-initialisation des ressources disponibles d'un point de peuplement touché par une catastrophe (exprimée en nombre d'habitants)	mécanisme inactif

Tableau 4.1 – État des lieux du paramétrage du modèle SimpopLocal avant son calibrage

- une simulation s'arrête quand 10000 agents innovation ont été créés (en comptant tous les clones)(c.f. section 3.2.3.8).

Le calibrage, ou du moins le pré-calibrage, constitue un des nombreux problèmes inverses que se posent les modélisateurs (BOURGINE et al., 2009). Un problème inverse est une question sur les sorties d'un modèle qui vise à comprendre quelles valeurs des paramètres d'entrée permettent d'obtenir certaines dynamiques ou certains *motifs*, c'est-à-dire des structures ou des configurations particulières. Cependant, le calibrage des modèles multi-agents est considéré comme une étape encore très difficile à atteindre dans le processus de modélisation et reste un défi majeur pour la communauté (CROOKS, CASTLE et BATTY, 2008). Le modèle SimpopLocal a donc été simplifié autant que possible pour ne retenir que cinq paramètres à calibrer, pour lesquels il n'était pas possible de trouver une estimation d'après des données empiriques ou des connaissances scientifiques. Ce nombre peut paraître très faible comparé à celui d'autres modèles multi-agents comme les modèles SIMPOP2, l'espace de paramétrage relativement étroit que cela représente nous a permis de développer un protocole de calibrage automatisé fondé sur une exploration intensive du domaine de paramétrage du modèle.

4.1.1.2 Des techniques usuelles de calibrage impossibles à mettre en œuvre

Pour la plupart des modèles multi-agents, le calibrage est fait par essais-erreurs en testant un grand nombre de valeurs de paramètres possibles et en comparant les sorties de simulations aux objectifs de calibrage, c'est-à-dire aux comportements de simulation attendus. Cette méthode *manuelle* a l'avantage d'une progression pas à pas et contrôlée par le chercheur dans la compréhension de la dynamique du modèle, mais elle est loin d'être efficace (STONEDAHL, 2011). Les modèles multi-agents sont généralement conçus dans l'esprit des systèmes complexes, c'est-à-dire dans le but d'étudier les effets d'interactions multiples entre de nombreux mécanismes. Cette caractéristique peut être à l'origine d'un comportement chaotique du modèle ou plus simplement de comportements simulés très variés, présentant des effets de seuils, de non-linéarité, etc. Ces effets rendent très difficile l'anticipation par le modélisateur des résultats d'une simulation par la seule connaissance de son paramétrage. De plus, les modèles multi-agents sont fréquemment caractérisés par un grand nombre de paramètres d'entrée, ce qui conduit à un large espace de paramétrage. Plus l'espace de paramétrage est large, plus les comportements possibles du modèle peuvent être nombreux, et plus il sera difficile de trouver le paramétrage à partir duquel obtenir les meilleurs comportements du modèle. La méthode d'exploration *manuelle*, qui est limitée dans le nombre de paramétrages qu'elle peut tester, présente donc un fort risque de tomber dans un optimum local, c'est-à-dire une solution de paramétrage qui corresponde à un état peu représentatif ou non-optimal au regard des objectifs de calibrage.

Cette méthode s'avère aussi particulièrement fastidieuse à entreprendre parce que très coûteuse en temps de calcul et/ou d'analyse des résultats. Elle a conduit à se contenter d'une centaine de simulations lors de l'expérimentation sur différents systèmes de villes d'une version consolidée du modèle SIMPOP2 (BRETAGNOLLE et PUMAIN, 2010), ce qui représente près d'une demi-année de travail sur le modèle. KOHLER, JOHNSON et al. (2007) publient des résultats de modélisation fondés sur la simulation de quelques dizaines de simulations. Cependant leur modèle inclut un très grand luxe de données empiriques facilitant l'ajustement (le risque est alors de construire un modèle *ad hoc*, calé sur les données d'un cas particulier, comme c'est le cas pour le modèle Anasazi (GUMERMAN et al., 2003; AXTELL, EPSTEIN et al., 2002) que nous avons discuté dans le chapitre précédent à la section 5). Pour des modèles se voulant plus génériques, la plupart des articles présentés dans la littérature omettent de préciser l'énergie investie dans cette phase difficile du travail de modélisation (AMBLARD, BOMMEL et ROUCHIER, 2007).

Dans le cas de SimpopLocal, cinq paramètres restent à calibrer. Leurs domaines de variation, détaillés dans le tableau 4.1, sont continus et larges, car aucune indication empirique sur leurs valeurs possibles n'est disponible. L'espace de paramétrage à explorer est donc à cinq dimensions et très étendu. Le meilleur moyen de connaître l'ensemble des comportements d'un modèle est de réaliser un *parameter sweeping* (CASANOVA et BERMAN, 2003) ou plan complet d'expérimentation, ce qui signifie tester toutes les combinaisons possibles de paramétrage. Si V est le nombre de valeurs testées pour chaque paramètre et N le nombre de paramètres du modèle, le nombre de simulations à réaliser et à examiner est V^N . Pour peu que l'on veuille tester l'effet de l'aléa habituellement non négligeable dans les modèles multi-agents, il faut multiplier ce nombre par le nombre s de simulations indépendantes du même paramétrage réalisées pour prendre en compte les effets de l'aléa : $s.(V^N)$. Or le temps de calcul pour la réalisation d'un plan complet est à peu près égal au nombre de simulations nécessaires multiplié par le temps de déroulement d'une simulation. Ainsi du fait du nombre des paramètres et du caractère généralement continu de leur domaine de variation, l'habituel plan complet est inefficace pour cibler un comportement recherché (i.e. calibrer le modèle) dans un espace de haute dimension, surtout si l'espace de calibrage³ est très étroit par rapport à l'espace d'exploration. Le maillage de recherche (c'est-à-dire le nombre de valeur à tester pour chaque paramètre) est difficile à déterminer *a priori* : si les mailles sont très larges (peu de valeurs de paramètre testées) il existe un fort risque de ne pas trouver d'espace de calibrage, et si les mailles sont très petites (beaucoup de valeurs de paramètre testées) les temps de calcul sont démultipliés, sans toutefois garantir de ne pas passer à côté d'un l'espace de calibrage. D'autre part, un plan complet engendre une grande quantité de données qu'il faut traiter et visualiser *a posteriori*. Le problème de recherche de motifs dans l'espace des dynamiques du modèle

3. L'espace de calibrage correspond aux domaines de variations de chaque paramètre à l'intérieur desquels le modèle engendre des résultats estimés conformes au critère de calibrage.

est ainsi remplacé par un problème de recherche de motifs dans une base de données. Le post-traitement de cette masse de données est long et fastidieux.

Ainsi les deux techniques (par essais-erreurs et plan complet) habituellement employées pour calibrer un modèle ne sont pas adaptées au problème du calibrage du modèle *SimpopLocal*, ni aux modèles multi-agents à nombreux paramètres de façon générale. D'autres méthodes d'exploration globale de modèle existent, tels que les plans d'expérimentation qui utilisent la méthode aléatoire de Monte-Carlo pour l'échantillonnage des valeurs de paramétrage testées. Ces plans d'expérimentation sont plus parcimonieux en temps de calcul que les plans complets et permettent de réaliser des *cartes* de comportements du modèle à partir du moment où ceux-ci peuvent-être résumés par un ou plusieurs indicateurs de sorties de simulation. Cependant, la recherche dans l'espace de paramétrage n'est pas optimisée pour le calibrage du modèle. Par définition une exploration de type Monte-Carlo se fait de manière aléatoire dans tout l'espace sans discrimination. Cette méthode permet de connaître les comportements possibles du modèle, mais oblige ensuite à rechercher un état calibré parmi tous les comportements du modèle. Cet état calibré n'est identifiable que si la finesse de résolution des cartes de comportements du modèle est suffisante. Cette finesse dépend du nombre d'expérimentations réalisées. Ces explorations présentent donc les mêmes inconvénients pour le calibrage que les plans complets : elles restent coûteuses en temps de calcul sans toutefois donner en résultat un état calibré du modèle. De façon similaire, les analyses de sensibilité globales (SALTELLI, CHAN, SCOTT et al., 2000) permettent de mieux comprendre les influences de paramètres sur le comportement du modèle, mais ne conduisent pas à la définition d'un état calibré du modèle. Bien que nécessaires, elles sont plutôt à utiliser en complément du calibrage du modèle, lorsqu'il a été vérifié que celui-ci peut produire un comportement estimé satisfaisant.

Dans la section 2.2.2, nous avons souligné le besoin d'une procédure de calibrage efficace et systématique, et qui puisse être réemployée tout au long du processus de modélisation. Il est donc nécessaire de définir et adapter à notre problème une procédure d'exploration de l'espace de paramétrage qui résulte en un état calibré du modèle. Cette procédure doit permettre une exploration globale de l'espace de paramétrage, car les bornes de variation des paramètres sont larges et aucun domaine de prédilection n'a été mis en évidence. Elle doit aussi être intelligente pour pouvoir guider la recherche au fur et à mesure de l'exploration de ce vaste espace et ainsi optimiser l'exploration et réduire les temps de simulation nécessaires.

4.1.2 Une méthode de calibrage automatique

4.1.2.1 Le calibrage comme un problème d'optimisation

Parce que SimpopLocal est un modèle exploratoire et théorique dont l'enjeu est de reproduire un ensemble de faits stylisés, le comportement attendu du modèle est bien défini. Ce comportement peut être quantifié en quelques objectifs ciblés, de manière à évaluer la distance entre le comportement effectivement simulé et le comportement recherché. L'exercice de calibrage du modèle peut ensuite être appréhendé comme un exercice d'optimisation par lequel on cherche à minimiser la différence entre le comportement simulé et le comportement recherché en jouant sur les valeurs des paramètres du modèle. On n'envisage donc plus le calibrage comme une recherche de comportements satisfaisants parmi l'ensemble des comportements possibles, mais bien comme un objectif qu'il nous faut atteindre, moyennant un questionnement inverse : existe-t-il une ou plusieurs combinaisons de paramètres permettant de remplir les objectifs fixés ? L'observation *a posteriori* devient question *a priori* : les objectifs préalablement définis pour évaluer une simulation (en quantifiant la distance relative entre le comportement simulé et le comportement recherché) deviennent les nouveaux guides permettant d'alimenter une ou plusieurs méthodes d'optimisation. Avec cette approche, l'exploration du très vaste espace des paramètres est guidée par la nécessité de minimiser la fonction objectif qui évalue l'écart entre le comportement simulé et le comportement induit par un jeu de paramètres. Cette approche du calibrage ne nécessite donc pas une exploration extensive ou totale de l'espace de paramétrage mais permet de guider stratégiquement l'exploration grâce aux résultats de simulations.

Toutes les méthodes d'optimisation permettant une recherche guidée dans un espace inconnu doivent jongler entre deux buts contradictoires : réduire le temps de recherche des solutions optimales tout en parcourant au mieux l'ensemble de l'espace porteur à la fois de bonnes et de mauvaises solutions pour garantir une bonne fiabilité du résultat. Pour notre problème d'optimisation, nous avons choisi d'utiliser les algorithmes évolutionnaires.

4.1.2.2 L'utilisation d'algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires s'appuient sur des heuristiques qui explorent un espace de recherche en suivant des stratégies souvent inspirées des processus naturels et dans le but de résoudre un problème d'optimisation. Les algorithmes évolutionnaires (dont les algorithmes génétiques) (HOLLAND, 1975) sont une famille d'algorithmes conçus sur le schéma de la sélection naturelle de la théorie Darwinienne de l'évolution des espèces. Leur principe est de générer de façon itérative des solutions candidates, appelées génomes, par mutation et croisement des génomes précédemment évalués et d'exercer sur cette population de génomes une pression sélective vers les génomes les mieux évalués. Au fur et à

mesure des itérations, l'algorithme converge vers une population de solution candidates qui répond au mieux à un ou plusieurs objectifs définis pour résoudre le problème d'optimisation. Dans l'utilisation que nous en faisons, un génome, ou solution candidate, est un paramétrage, c'est-à-dire le jeu de valeurs prises par l'ensemble des paramètres du modèle. Chaque génome, i.e. paramétrage, est évalué en fonction des sorties de simulations qu'il produit, résumées en plusieurs indicateurs clés. Ces indicateurs clés permettent donc d'apprécier la qualité de la réponse (du comportement simulé) produite par chaque paramétrage. Les valeurs recherchées pour ces indicateurs sont les objectifs du problème d'optimisation.

Les algorithmes évolutionnaires sont considérés comme de bonnes méthodes pour le calibrage de modèles (CALVEZ et HUTZLER, 2006 ; STONEDAHL, 2011). Ils ont été utilisés pour calibrer des modèles multi-agents issus de domaines scientifiques très divers : médecine (CASTIGLIONE et al., 2007), écologie (DUBOZ et al., 2010), économie (ESPINOSA, 2012 ; F. W. Et U. 2010), hydrologie (SOLOMATINE, DIBIKE et KUKURIC, 1999), etc. Pourtant, malgré l'utilisation de plus en plus courante des modèles multi-agents en sciences sociales, cette méthode de calibrage est encore très rarement appliquée. À notre connaissance seulement quelques applications à des modèles inspirés de systèmes réels ont été menées (HEPPENSTALL, EVANS et BIRKIN, 2007 ; STONEDAHL et WILENSKY, 2010). En effet, l'application de ce type d'expérimentation reste un vrai défi :

- Les algorithmes évolutionnaires requièrent la définition d'un ou de plusieurs objectifs quantitatifs, appelés fonctions objectifs ou fonction de fitness, qui permettent d'évaluer les sorties de simulations de manière cohérente et harmonieuse.
- Ils engendrent une charge de calcul écrasante qui nécessite des savoirs-faire techniques adaptés et souvent l'utilisation d'une infrastructure de calcul spécifique.
- Ils sont amenés à optimiser des fonctions de fitness souvent bruitées (en raison de la stochasticité des modèles), ce qui est aussi un exercice très difficile (DI PIETRO, WHILE et BARONE, 2004).

C'est grâce à notre équipe inter-disciplinaire que nous avons pu surmonter ces obstacles, avec l'utilisation de techniques et d'outils de pointe⁴.

4. Un article sur le calibrage du modèle à été soumis au journal *Environnement and Planning B* : "Half a billion simulations : Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model", C. Schmitt, S. Rey Coyrehourcq, R. Reuillon, D. Pumain

4.1.2.3 Une exploration de l'espace de paramétrage guidée par trois objectifs de calibrage qui prennent en compte la stochasticité du modèle

La technique de calibrage automatique que nous proposons s'appuie sur une exploration de l'espace de paramétrage qui est guidée par des objectifs de simulation. Chaque paramétrage simulé est évalué en fonction des sorties de simulation qu'il produit. L'évaluation de chaque paramétrage reflète sa capacité à produire les sorties de simulation qui respectent au mieux les critères de calibrage du modèle, c'est à dire qui reproduisent au mieux les faits stylisés caractéristiques des systèmes que nous cherchons à simuler. Les paramétrages produisant des sorties de simulations les plus proches de ces critères sont ensuite utilisés comme base pour générer de nouveaux paramétrages par mutation et croisement, qui seront à leur tour évalués. Ces critères de calibrage peuvent être traduits pour le modèle SimpopLocal en trois objectifs quantifiables :

- l'objectif de distribution : une distribution log-normale des tailles de points de peuplement en fin de simulation (DURAND-DASTÈS et al., 1998 ; JOHNSON, 1977 ; LIU, 1996 ; SANDERS, 2012) ;
- l'objectif de population : une taille du plus grand point de peuplement qui s'approche en fin de simulation des 10000 habitants (BAIROCH, 1985 ; MARCUS et SABLOFF, 2008)
- l'objectif de temps : un temps de simulation pour s'approcher de cette configuration finale de près de 4000 pas de simulation (BAIROCH, 1985 ; MARCUS et SABLOFF, 2008), soit une durée de 4000 ans.

L'objectif de population et l'objectif de temps permettent de fixer l'ordre de grandeur de la croissance du système simulée. Si ces objectifs sont atteints, l'un des points de peuplement à l'état initial du système composé d'une centaine d'habitants aura atteint 10000 habitants en 4000 ans. Il est possible de calculer le taux moyen de croissance par période (*TMCA*) d'un point de peuplement, en fonction de sa taille initiale $P_{initiale}$ et de sa taille finale P_{finale} après n périodes :

$$TMCA = \left(\sqrt[n]{\frac{P_{finale}}{P_{initiale}}} - 1 \right) \times 100$$

D'après cette formule, le taux de croissance moyen annuel simulé de ce point de peuplement sera proche de 0,1%. Ce point de peuplement étant le plus grand du système, le taux de croissance moyen annuel simulé pour l'ensemble du système sera vraisemblablement inférieur à cette valeur (et donc plus proche de 0,02%, la valeur constatée sur les données empiriques).

Ces trois objectifs sont nécessaires, complémentaires et non-redondants. À l'état initial la distribution des point de peuplement est log-normale par construction, aussi le modèle est capable de présenter des distributions finales de type log-normal sans aucune évolution nécessaire. L'objectif de population permet de disqualifier les paramétrages ne produisant qu'une évolution jugée trop faible en termes de croissance. Par ailleurs, du fait des boucles de rétro-action positives présentes dans le modèle (c.f. section 3.2), le modèle est aussi capable de générer des dynamiques très rapides, emballées, pour atteindre l'objectif de population en une petite centaine de pas de simulation. Avec l'objectif de temps, c'est-à-dire la durée nécessaire à la construction d'un point de peuplement de *grande taille* pour l'époque, nous cherchons à contrôler cette dynamique globale. *A priori*, ces trois objectifs peuvent même paraître contradictoires pour l'optimisation du modèle, tirant chacun vers des tendances opposées de dynamique. Cette configuration est idéale pour les algorithmes évolutionnaires, car elle favorise la diversification des recherches dans l'espace d'exploration. Les résultats du calibrage du modèle présentés dans la section 4.1.3 permettent de confirmer cette intuition.

Le modèle SimpopLocal étant stochastique, les sorties de simulations peuvent varier d'une simulation à l'autre. L'évaluation du paramétrage sur les trois objectifs de calibrage doit prendre en compte cette variabilité. Pour ce faire, de nombreuses réalisations indépendantes du paramétrage à évaluer doivent être simulées. Chaque réalisation indépendante d'un même paramétrage, appelée réplication, est une simulation du même paramétrage utilisant une graine aléatoire⁵ différente. L'évaluation du paramétrage testé doit ensuite mesurer et résumer la variabilité des sorties de simulation. La difficulté de la prise en compte de la stochasticité du modèle réside dans le choix du nombre de réplifications à réaliser. Un trop grand nombre de réplifications démultiplie les temps de calcul. Un trop petit nombre de réplifications conduit au risque de mal évaluer un paramétrage et donc de fausser les recherches de l'algorithme d'optimisation. Pour déterminer le nombre de réplifications nécessaires pour l'évaluation d'un paramétrage de SimpopLocal, l'impact du nombre de réplifications sur l'évaluation de l'objectif de population a été testé. L'objectif de population est de 10000 habitants pour le plus grand point de peuplement en fin de simulation. Si P_{max} est la population du plus grand point de peuplement en fin de simulation, la capacité du paramétrage à respecter cet objectif est quantifiée pour chaque réplication par la valeur $|(P_{max} - 10000)/10000|$. Pour prendre en compte la variabilité des sorties de simulation, le score du paramétrage sur l'objectif de simulation correspond à la médiane de cette valeur finale sur l'ensemble des réplifications réalisées. Quatre nombres de réplifications sont testés : 30, 100, 200 et 1000. Et 100 réalisations (ou séries) de chaque nombre de réplifications sont exécutées. Le paramétrage choisi pour ce test est un paramétrage

5. "Une graine aléatoire est un nombre utilisé pour l'initialisation d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires. Toute la suite de nombres produite par le générateur découle de façon déterministe de la valeur de la graine.", source http://fr.wikipedia.org/wiki/Graine_aleatoire

obtenant de très bons scores et étant un bon candidat pour le calibrage du modèle.

La figure 4.1 montre que quel que soit le nombre de réplifications considérées, l'évaluation du paramétrage tourne autour de la même valeur : 0,032 (soit une variation d'environ 3% entre la population maximale simulée et la population maximale attendue). Cependant suivant le nombre de réplifications considérées, l'évaluation du paramétrage est plus ou moins dispersée. L'évaluation sur 30 réplifications varie énormément, ce qui signifie que si l'évaluation de chaque paramétrage est réalisée sur seulement 30 réplifications, la probabilité de mal évaluer le paramétrage et d'obtenir un score trois fois plus grand ou au contraire deux fois plus petit que sa réelle valeur est très grande. L'évaluation sur 1000 réplifications est beaucoup plus fiable, car beaucoup plus stable autour de la valeur réelle. Cependant, réaliser un calibrage automatisé sur une base de 1000 réplifications par paramétrage évalué sur le modèle SimpopLocal est impensable dans des temps réalistes (à titre indicatif, dans l'expérimentation de calibrage que nous détaillons dans cette partie, près de 5 millions de paramétrages ont été testés). Il nous faut donc trouver un compromis entre un temps de calcul acceptable et une fiabilité de l'évaluation du paramétrage. Sous ces conditions, 100 réplifications pour évaluer un paramétrage semble un meilleur compromis. Mais ce compromis présente tout de même un risque non négligeable de mauvaise évaluation. Pour y remédier, des parades à ce risque (présentées dans la suite) ont été mises en place dans l'algorithme évolutionnaire développé pour le calibrage du modèle. Chaque paramétrage est donc simulé et évalué sur 100 réplifications.

Pour pouvoir utiliser les algorithmes évolutionnaires, il est nécessaire de donner une valeur quantifiée à l'évaluation d'un paramétrage en fonction des trois objectifs que nous avons fixés et de la variabilité des résultats sur l'ensemble des réplifications réalisées. Pour faciliter l'utilisation des algorithmes, l'évaluation est conçue de telle façon qu'une minimisation des scores sur les trois objectifs soit garante d'un meilleur calibrage du modèle. Par ailleurs, la normalisation de cette évaluation facilite les comparaisons transversales entre paramétrages en fonction de leur score sur les trois objectifs. Le vecteur de trois scores ainsi obtenu est appelé *fitness* du paramétrage. Voici comment sont quantifiés les trois scores de la fonction d'évaluation ou *fonction de fitness* :

- L'objectif de distribution quantifie la capacité du modèle à produire des distributions de taille de points de peuplement qui suivent une loi log-normale. Tout d'abord, l'algorithme évalue chaque réplification suivant le test de Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons. Ce test mesure l'écart entre la distribution obtenue par simulation et une distribution théorique log-normale de même moyenne et écart-type. Deux critères sont pris en compte, avec pour valeur 1 si le test est rejeté et 0 sinon : la vraisemblance de la distribution (le test renvoie 0 si la p-value $> 5\%$), et la distance entre la distribution simulée et la distribution théorique (le test renvoie 0 si $D - value < D\alpha$ ⁶). Pour résumer les évaluations des 100 réplifications du même

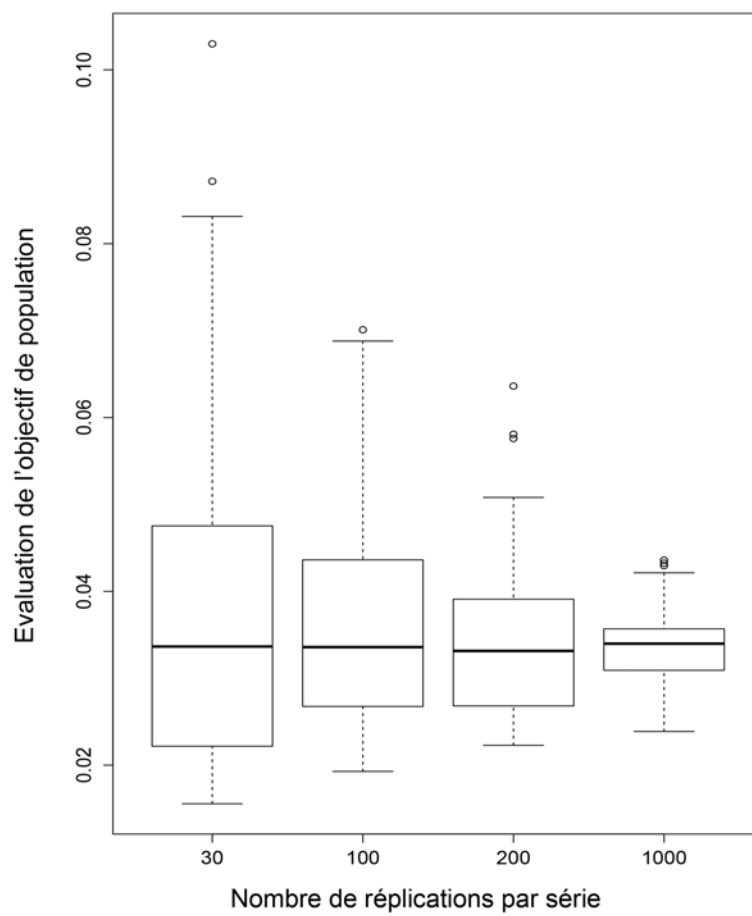


Figure 4.1 – Variation de la dispersion de l'évaluation de l'objectif de population sur 100 séries en fonction du nombre de répliques par série

paramétrage dans un unique indicateur, les valeurs obtenues sur les deux tests sont additionnées pour les 100 réplifications. Le meilleur score possible est donc 0 (tous les tests ont renvoyé la valeur 0) et le pire 200 (tous les tests ont renvoyé la valeur 1). En divisant ce score obtenu par la pire valeur possible (200), on obtient un score normalisé qui représente l'erreur relative engendrée par le paramétrage testé sur cet objectif de distribution.

- L'objectif de population quantifie la capacité du modèle à engendrer des points de peuplement qui atteignent une taille ciblée. Chaque réplification du paramétrage testé est évaluée en mesurant l'écart entre la taille du plus grand point de peuplement en fin de simulation et la valeur attendue de 10000 habitants : $|(P_{max} - 10000)/10000|$, avec P_{max} la population du plus grand point de peuplement en fin de simulation. L'évaluation du paramétrage renvoie la médiane de valeurs obtenues sur les 100 réplifications simulées. Cette valeur représente l'erreur relative engendrée par le paramétrage testé sur cet objectif de population. Plus elle s'approche de la valeur 0, plus l'erreur est faible.
- L'objectif de temps quantifie la capacité du modèle à générer, au bout d'un nombre de pas de simulation attendu, la configuration finale recherchée. La durée de chaque réplification du paramétrage testé est évaluée en mesurant l'écart entre le nombre de pas de simulation effectif et la valeur attendue de 4000 pas de simulation : $|(Temps_{simulation} - 4000)/4000|$, avec $Temps_{simulation}$ le nombre de pas de simulation réalisés avant l'arrêt de la simulation. L'évaluation du paramétrage renvoie la médiane des valeurs obtenues sur les 100 réplifications simulées. Cette valeur représente l'erreur relative engendrée par le paramétrage testé sur cet objectif de temps. Plus elle s'approche de la valeur 0 et plus l'erreur est faible.

4.1.2.4 La spécificité des explorations par optimisation multi-objectif

Ces trois fonctions objectif constituent la *fonction de fitness* du calibrage de SimpopLocal (qui est donc un vecteur de 3 scores). Ce problème d'optimisation est donc multi-objectif. Une évaluation multi-objectif ne conduit pas forcément à la sélection d'un paramétrage unique et peut mener à un ensemble de candidats possibles pour le calibrage : chaque paramétrage sélectionné par la procédure représente un compromis possible sur les trois objectifs. Ce type d'algorithmes calcule donc des solutions-compromis. L'ensemble de ces solutions-compromis forment un *front de Pareto*. Cette expression recouvre un ensemble de solutions dans lequel aucune des solutions n'est dominée par une autre sur l'ensemble des objectifs à la fois. Ainsi sur la figure 4.2 qui représente l'ensemble des paramétrages testés en fonction de leur valeur prise sur deux objectifs, on remarque que

6. Calculé avec $\alpha = 1.36$

le paramétrage A est meilleur que le paramétrage B sur le premier objectif (qu'il faut minimiser), alors que le paramétrage B est meilleur que le paramétrage A sur le deuxième objectif (qu'il faut aussi minimiser). Si les deux objectifs sont des critères de sélection de même poids dans la décision, alors il n'est pas possible de distinguer entre les deux un meilleur paramétrage. Ils représentent deux compromis différents. On peut ainsi définir un groupe de paramétrages parmi lesquels il n'est pas possible d'en trouver un qui serait un meilleur compromis qu'un autre sur les deux objectifs à la fois. Ce groupe, appelé front de Pareto, est figuré par la ligne rouge sur le graphique.

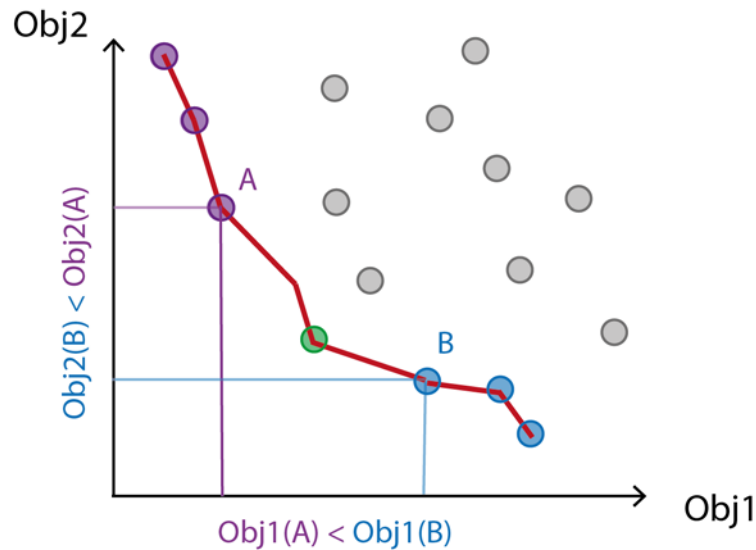


Figure 4.2 – Schématisation d'un front de Pareto

Pour un problème d'optimisation multi-objectif, il y a plusieurs moyens d'optimiser pour trouver des solutions. Dans les cas où les objectifs sont compatibles, il est aisé pour un algorithme de trouver le compromis qui reflète au mieux l'optimisation sur tous les objectifs à la fois. Mais dans le cas où les objectifs ne sont pas compatibles simultanément, il existe plusieurs grands types de compromis : les compromis qui optimisent au mieux un objectif au détriment des autres, et les compromis qui optimisent tous les objectifs mais sans pourtant atteindre les meilleures valeurs possibles sur chacun d'entre eux. Sur la figure 4.2, le premier cas correspondrait au profil des paramétrages en violet (qui optimisent l'objectif 1) et au profil des paramétrages en bleu (qui optimisent l'objectif 2), alors que le deuxième cas correspondrait au profil des paramétrages en vert.

4.1.2.5 Le recours au calcul massivement distribué

L'utilisation de méthodes d'optimisation comme les algorithmes évolutionnaires pour le calibrage d'un modèle multi-agents stochastique demande une charge de calcul très importante. Dans son implémentation la plus efficace une exécution de SimpopLocal dure en

moyenne une seconde et demi sur un processeur moderne. Le plan d'expérimentation proposé pour calibrer le modèle SimpopLocal estime un très grand nombre de paramétrages différents (pour calibrer SimpopLocal nous avons évalué près de 5 millions de paramétrages) sur 100 répliques chacun. Il requiert donc une charge de calcul très importante (soit environ 20 années de calcul sur un ordinateur personnel). Cette lourde charge de calcul ne peut être menée à bien que sur des environnements de calcul haute performance avec parallélisation des évaluations, c'est-à-dire des simulations conduites et évaluées en parallèle, simultanément, sur un grand nombre de processeurs différents. L'exploration des modèles à cette échelle pose cependant un réel défi. Elle suppose d'orchestrer l'exécution de dizaines de milliers d'instances du modèle sur des calculateurs répartis dans le monde entier. Cependant une utilisation efficace de cet environnement distribué est entravée par la forte probabilité de pannes localisées et l'impossibilité de connaître avec certitude un état global du système. La plate-forme OpenMOLE⁷ (REUILLON, CHUFFART et al., 2010; REUILLON, LECLAIRE et REY-COYREHOURCQ, 2013) établit un pont qui permet aux modélisateurs de franchir le fossé technique et méthodologique qui les sépare du calcul haute performance distribué (c.f. section 2.2.3).

Pour le calibrage du modèle SimpopLocal, un algorithme évolutionnaire multi-objectif classique nommé SMS-EMOA (EMMERICH, BEUME et NAUJOKS, 2005) a été implémenté de façon parallélisée, grâce à OpenMOLE. Les paramètres de cet algorithme sont exposés dans le tableau 4.2. Le code de cette application ainsi que le code pour le calcul de la fonction de fitness sont libres et accessibles⁸. Nous présentons ici brièvement les principes de l'implémentation de cette exploration automatisée et guidée par trois objectifs de calibrage. Cette implémentation, qui demande un très bon niveau technique en informatique, a été réalisée par Sébastien Rey Coyrehourcq et Romain Reuillon.

Cet algorithme évalue des millions de paramétrages pour approximer au mieux le front de Pareto. Pour mener à bien cette très importante charge de calcul, l'algorithme évolutionnaire SMS-EMOA est distribué sur les nombreux processeurs de l'EGI⁹ (*European Grid Infrastructure*), du réseau France-Grille¹⁰, grâce à la technique des îlots connue sous le nom de "*island model*" (EMMERICH, BEUME et NAUJOKS, 2005; WHITLEY, RANA et HECKENDORN, 1997). Le modèle classique des îlots consiste à instancier des îlots (chaque îlot est un algorithme évolutionnaire isolé) sur plusieurs unités de calcul et à organiser la migration des meilleures solutions d'un îlot à l'autre. L'EGI est un système de traitement par lot (*batch*) comprenant des unités de calcul réparties dans le monde entier. Cette architecture rend l'organisation de la communication entre les îlots très compliquée. Le modèle des îlots a donc été adapté pour être appliqué sur l'EGI.

7. www.openmole.org

8. <http://iscpif.github.io/simpoplocal-epb/>

9. <http://www.egi.eu/>

10. <http://www.france-grilles.fr/>

Algorithme évolutionnaire	SMS-EMOA
Génome	$P_{creation}$ [0 ; 1], $P_{diffusion}$ [0 ; 1], $InnovationImpact$ [0 ; 2], $DistanceDecay$ [0 ; 4], $Rmax$ [1 ; 40 000]
Fonction de fitness	Fonction multi-objectif : objectif de distribution, objectif de population, objectif de temps
Croisement	Opérateur SBX RGA avec modification de variable bornée (c.f. appendix A de DEB et al. (2000)) : indice de distribution de 2,0 et taux de croisement de 0,5
Mutation	Mutation gaussienne et auto-adaptation (HINTERDING, 1995)
Dominance	Epsilon dominance : $\rightarrow$ epsilons = distribution 0, population 10, temps 10
Nadir	Objectif de distribution : 500, Objectif de population : 100000, Objectif de temps : 10000
Sélection	Tournoi binaire
Population	200

Tableau 4.2 – Les paramètres de l’algorithme évolutionnaire implémenté, d’après (SCHMITT, REUILLON et al., submitted)

Durant le calcul, une population centrale de 200 paramétrages (appelés individus dans l’algorithme évolutionnaire) est maintenue sur la machine qui orchestre la soumission des tâches de calcul sur la grille. Chaque tâche calcule l’évolution de la population d’un îlot, grâce à une instanciation indépendante de l’algorithme SMS-EMOA initialisée avec une population de 50 individus (ou paramétrages) échantillonnée de façon aléatoire parmi la population centrale de 200 individus. Les *cycles de vie* des tâches de calcul sont gérés par l’EGI : chaque tâche est soumise à l’EGI puis dans la file d’attente d’une grappe d’unités de calcul et enfin exécutée quand une place sur une unité de calcul de la grappe se libère. Chaque tâche est programmée pour s’exécuter pendant 1 heure à partir du moment où elle est lancée.

Quand une tâche sur un îlot est achevée, la population finale qu’elle contient (les paramétrages sélectionnés par l’algorithme) est transférée sur la machine de soumission et fusionnée à la population centrale en utilisant l’algorithme élitiste de la méthode SMS-EMOA (élitisme basé sur la contribution à l’hypervolume, c.f. section 4.1.3.1). Cet algorithme garde les 200 meilleurs individus en fonction des objectifs de l’optimisation et de critères de diversité. Une nouvelle tâche de calcul est alors soumise à la grille de calcul. Cet algorithme est exécuté jusqu’à ce que 100000 tâches soient achevées.

Comme la fonction de fitness (ou fonction d’évaluation) tient compte de la stochasticité du modèle, le modèle est répliqué 100 fois pour évaluer la *fitness* d’un paramétrage.

Malgré cette précaution, il est connu (DI PIETRO, WHILE et BARONE, 2004) que parmi les millions d'exécutions lancées par l'algorithme, certains individus (ou paramétrages) peuvent être chanceux et être mal-évalués par rapport à leur performance réelle. Ces occurrences créent des biais dans le processus d'évolution de l'optimisation. DI PIETRO, WHILE et BARONE (2004) répertorient diverses méthodes pour régler ce problème. Parmi celles proposées, nous avons choisi de ré-évaluer de façon régulière des individus déjà évalués en implémentant une stratégie spécifique : une évaluation sur cent est consacrée à la ré-évaluation d'un paramétrage déjà évalué plutôt qu'à l'évaluation d'un nouveau paramétrage. Ainsi un paramétrage mal évalué la première fois et gardé parmi les solutions optimales par erreur, sera probablement évalué correctement lors de la seconde évaluation et éliminé des solutions optimales.

L'expérimentation de calibrage automatique dont nous présentons les résultats dans la section 4.1.3 a nécessité plus de 500 millions d'exécutions du modèle, ce qui représentait plus de 20 années consécutives de calcul sur un seul processeur. Grâce à la parallélisation orchestrée par OpenMOLE et à la mise à disposition de puissance de calcul de l'EGI via le réseau France-Grille, ce temps de calcul a été réduit à 3 ou 4 jours pleins. Cette expérimentation a donc été rendue possible par l'utilisation de ces techniques de gestion de calcul intensif sans lesquelles il n'était pas envisageable de s'aventurer dans une exploration intensive des comportements du modèle.

4.1.3 Analyse des résultats de l'exploration guidée et automatisée pour le calibrage de SimpopLocal

4.1.3.1 La convergence de l'algorithme évolutionnaire pour la proposition de jeux de valeurs de paramètres candidats au calibrage

Les algorithmes évolutionnaires sont de bonnes méthodes quand aucune autre méthode d'exploration exhaustive n'est envisageable. Cependant, ils ne garantissent pas l'optimalité du résultat fourni. Parce qu'elles sont de nature heuristique, ces procédures peuvent continuer les calculs indéfiniment, à la recherche de solutions toujours plus optimales. Dans ce travail nous avons utilisé comme critère d'arrêt le nombre d'îlots exécutés que nous avons choisi pour utiliser au mieux la puissance de calcul à disposition. Ainsi, l'expérimentation est arrêtée après l'exécution de 190 000 îlots (i.e. près de 200 000 heures de calcul) et est, de la sorte, pré-conditionnée pour ne durer que 3 à 4 jours.

On considère généralement que l'algorithme a convergé lorsque, malgré sa recherche, il ne trouve plus de meilleurs candidats que ceux qu'il a déjà sélectionnés. Cela signifie que le front de Pareto n'évolue plus ou très peu. L'un des meilleurs indicateurs actuellement disponibles pour mesurer l'état de convergence d'un algorithme d'optimisation multi-objectif est l'évolution de l'hypervolume (FONSECA, PAQUETE et LOPEZ-IBANEZ, 2006 ;

NAUJOKS, BEUME et EMMERICH, 2005 ; ZITZLER et THIELE, 1998). L'hypervolume mesure le volume de la portion *dominée* (c'est-à-dire celle qui ne répond pas aux dynamiques recherchées) de l'espace des objectifs : il est défini comme le volume compris entre un point extrême (défini comme l'optimisation la moins bonne possible, i.e. 100% d'erreur sur les trois objectifs) et la frontière dessinée par le front de Pareto (rassemblant les meilleures optimisations possibles). À mesure que l'algorithme trouve de meilleurs paramétrages qui optimisent le calibrage en minimisant les objectifs, l'hypervolume augmente peu à peu, jusqu'à une phase où ce volume n'évolue guère car l'algorithme d'optimisation stagne. La stagnation de l'hypervolume indique que l'algorithme d'optimisation a convergé. La figure 4.3 illustre l'évolution de l'hypervolume au fur et à mesure de l'exploration de l'espace de paramétrage, en fonction du nombre d'îlots exécutés, qui peut être quantifié en terme d'heures de calcul par processeur (heures/CPU). Elle montre la stabilisation de l'hypervolume après 120000 heures de calcul. Cette stabilité sur le long terme (70000 heures/CPU) indique que l'algorithme a convergé. Le front de Pareto n'aurait probablement pas été optimisé avec plus de temps de calcul. Ce résultat montre que malgré un critère d'arrêt choisi pour des raisons techniques, les paramétrages du front de Pareto sont vraisemblablement les meilleurs qui pourraient être obtenus avec cette méthode, et qu'ils correspondent probablement à un optimum global.

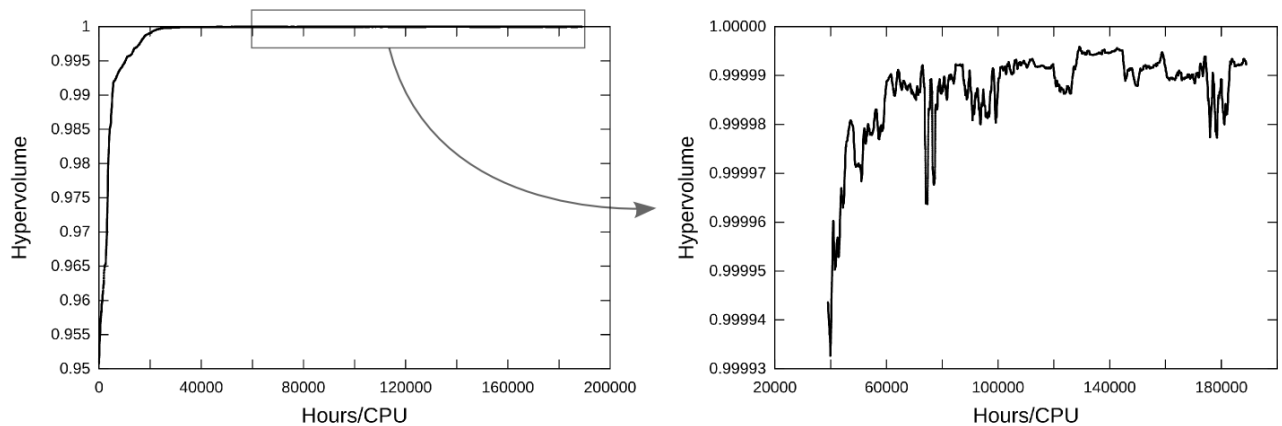


Figure 4.3 – Évolution de l'hypervolume délimité par le front de Pareto et la convergence de l'algorithme évolutionnaire sous la contrainte de 3 objectifs

4.1.3.2 Sélection des meilleurs paramétrages et discussion des valeurs proposées

Cette application de la démarche d'exploration automatisée de modèle a permis de répondre au problème de calibrage de SimpopLocal. Un ensemble de 200 paramétrages amenant de bons résultats selon les objectifs fixés pour le calibrage du modèle SimpopLocal ont été identifiés. Comme nous voulions nous assurer de la bonne évaluation de

chaque paramétrage sélectionné (les mauvaises évaluations étaient encore possibles à ce stade), 10000 réplifications de chaque paramétrage du front de Pareto ont été exécutées. Avec les nouveaux scores d'évaluation, il a été possible de calculer la dominance du front de Pareto et d'exclure du lot formé par les 200 paramétrages ceux effectivement dominés. 62 paramétrages ont ainsi été conservés.

Parmi ces 62 paramétrages, certains sont plus satisfaisants que d'autres. Nous avons considéré comme inadaptés ceux qui présentent au moins un des scores sur les trois objectifs qui dépasse 10% d'erreur par rapport au résultat attendu (i.e. au moins un des scores sur les trois objectifs supérieur à 0,1). Seulement 29 paramétrages demeurent après filtrage par cette nouvelle condition. Les valeurs de scores sur les trois objectifs des 29 paramétrage sélectionnés sont présentées dans le tableau 4.3. Comme nous l'avons expliqué dans la section 4.1.2.4, une exploration multi-objectif ne conduit pas à la sélection d'une unique solution optimisée, mais plutôt à un ensemble de solutions-compromis : chaque paramétrage sélectionné représente un compromis possible sur les trois objectifs. Dans le tableau 4.3, il est possible de distinguer les paramétrages qui optimisent au mieux un ou deux objectifs au détriment des autres, de ceux qui offrent un meilleur compromis sur les trois objectifs à la fois sans pour autant atteindre les meilleurs scores possibles sur les objectifs. Cette diversité confirme que les trois objectifs ne sont pas redondants et que l'algorithme oscille entre les trois pour trouver les meilleurs paramétrages de calibrage possibles.

Cet ensemble de 29 paramétrages représente un ensemble de conditions *suffisantes* pour le calibrage du modèle. Le tableau 4.4 nous permet d'en donner un résumé grâce à une comparaison entre l'espace dans lequel s'est effectué l'exploration et l'espace dans lequel est inclus toutes les meilleures solutions de paramétrage proposées par l'algorithme d'optimisation multi-objectif. On constate que les valeurs prises par chaque paramétrage sont toutes comprises dans un voisinage très restreint. En effet, le ratio entre le volume d'exploration et le volume des solutions est de $4,7 \cdot 10^{-16} / 320000 = 1,5 \cdot 10^{-21}$. Ce résultat pousse à croire que l'algorithme serait bien tombé dans un minimum global, même s'il n'est pas possible à ce stade de l'affirmer catégoriquement. Il permet toutefois de dire qu'il suffit que les paramètres soient tous fixés autour de ces ordres de grandeurs (définis dans un espace très restreint) pour obtenir des sorties de simulation pertinentes. Il faut rappeler ici que les valeurs estimées pour chaque paramétrage n'ont pas de signification absolue, mais fonctionnent et font sens toutes ensembles, en fonction des relations et des interactions entre les mécanismes du modèle. Toutefois, leur analyse plus précise montre

11. Par soucis de lisibilité, les valeurs présentées dans ce tableau sont arrondies. Elles ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour une simulation de SimpopLocal, le modèle étant très sensible dans cet espace de paramétrage. Les valeurs exactes pour le paramétrage en gras, utilisées pour d'autres expérimentations, sont détaillées dans le tableau 4.5. Par ailleurs, le paramétrage en gras correspond au paramétrage choisi pour produire les sorties de simulation illustrées par les figures 4.4 et 4.5

Paramétrage					% d'erreur sur les scores		
R_{max}	$Distance-Decay$	$P_{creation}$	$P_{diffusion}$	$Innovation-Impact$	$Objectifdistrib-$ $ution$	$Objectifpopula-$ $tion$	$Objectiftemps$
10464	0,691	$1, 11.10^{-6}$	$7, 90.10^{-7}$	0,0077	2,02	6,59	1,00
10465	0,709	$1, 14.10^{-6}$	$7, 88.10^{-7}$	0,0078	2,04	7,31	0,10
10459	0,705	$1, 15.10^{-6}$	$7, 92.10^{07}$	0,0077	2,22	6,98	0,48
10465	0,708	$1, 15.10^{-6}$	$7, 86.10^{-7}$	0,0078	2,51	6,00	0,40
10261	0,679	$1, 17.10^{-6}$	$7, 78.10^{-7}$	0,0078	2,79	5,29	4,55
10262	0,679	$1, 15.10^{-6}$	$7, 52.10^{-7}$	0,0078	2,95	5,00	2,15
10262	0,665	$1, 14.10^{-6}$	$7, 24.10^{-7}$	0,0078	2,99	5,53	1,23
10261	0,683	$1, 12.10^{-6}$	$7, 38.10^{-7}$	0,0080	3,1	4,34	1,15
10260	0,699	$1, 17.10^{-6}$	$7, 38.10^{-7}$	0,0079	3,62	5,51	0,20
10287	0,690	$1, 23.10^{-6}$	$7, 56.10^{-7}$	0,0078	3,63	3,74	3,46
10259	0,688	$1, 20.10^{-6}$	$7, 41.10^{-7}$	0,0079	3,74	3,55	2,48
10169	0,736	$1, 29.10^{-6}$	$7, 39.10^{-7}$	0,0079	4,90	5,20	0,03
10205	0,683	$1, 19.10^{-6}$	$7, 42.10^{-7}$	0,0082	5,10	2,60	6,03
10126	0,738	$1, 22.10^{-6}$	$7, 61.10^{-7}$	0,0082	5,69	2,88	1,50
10126	0,738	$1, 24.10^{-6}$	$7, 39.10^{-7}$	0,0082	6,02	3,08	0,55
10096	0,701	$1, 14.10^{-6}$	$7, 14.10^{-7}$	0,0084	6,12	2,58	1,55
10169	0,736	$1, 29.10^{-6}$	$7, 39.10^{-7}$	0,0080	6,25	2,46	1,20
10165	0,734	$1, 29.10^{-6}$	$7, 24.10^{-7}$	0,0080	6,31	2,91	0,30
10121	0,732	$1, 28.10^{-6}$	$7, 41.10^{-7}$	0,0081	6,41	2,36	1,90
10164	0,735	$1, 29.10^{-6}$	$7, 27.10^{-7}$	0,0080	6,45	2,74	0,45
10103	0,733	$1, 24.10^{-6}$	$7, 42.10^{-7}$	0,0084	7,67	1,90	3,10
10092	0,736	$1, 29.10^{-6}$	$7, 14.10^{-7}$	0,0082	7,81	2,22	1,10
10098	0,737	$1, 29.10^{-6}$	$7, 12.10^{-7}$	0,0082	7,84	2,55	0,58
10094	0,741	$1, 28.10^{-6}$	$7, 12.10^{-7}$	0,0083	8,46	1,99	1,00
10129	0,737	$1, 29.10^{-6}$	$7, 07.10^{-7}$	0,0082	8,64	1,97	0,68
10110	0,735	$1, 28.10^{-6}$	$6, 77.10^{-7}$	0,0083	9,04	2,48	0,03
10091	0,744	$1, 31.10^{-6}$	$7, 25.10^{-7}$	0,0083	9,22	1,51	2,68
10091	0,741	$1, 31.10^{-6}$	$7, 12.10^{-7}$	0,0083	9,61	1,49	2,15
10109	0,734	$1, 28.10^{-6}$	$6, 79.10^{-7}$	0,0084	9,64	1,77	0,18

Tableau 4.3 – Paramétrages identifiés par l'application de la procédure de calibrage automatisée du modèle SimpopLocal et leurs scores sur les trois objectifs de calibrage¹¹

des aspects intéressants.

D'abord, les 29 paramètres ont tous en commun la particularité d'identifier correctement l'ordre de grandeur du seul paramètre du modèle qui peut être apprécié à partir des conditions initiales : la ressource maximale R_{max} , paramètre qui sert à borner la règle de croissance logistique de la population. Ce paramètre est exprimé en nombre d'habitants maximum qui peut être accueilli par chaque point de peuplement. Comme l'objectif de taille du plus grand point de peuplement est de 10000 habitants, il fallait que la valeur de ce paramètre ne soit pas inférieure à cette grandeur pour permettre à la dynamique de croissance de l'atteindre. Cependant les effets non-linéaires des interactions qui jouent sur les dynamiques de croissance de chaque point de peuplement ne permettaient pas d'émettre d'estimations plus précises : comme la loi de croissance suit une courbe logistique, c'est-à-dire asymptotique au voisinage de l'infini, une borne de croissance (R_{max}) à 10000 n'aurait pas permis d'atteindre cette taille, et à l'inverse, une borne de croissance bien supérieure à 10000 aurait largement fait dépasser l'objectif de population. Dans ce contexte, comment définir une borne qui permette à la fois une croissance suffisamment forte pour qu'au moins un point de peuplement atteigne l'objectif de taille, sans pour autant rendre cet objectif trop facile à dépasser et entraîner tout le système dans une croissance trop forte ? L'algorithme d'optimisation montre que si cette borne R_{max} est paramétrée globalement entre 100 et 500 habitants au dessus de cette valeur objectif de 10000 habitants, le modèle donne de bons résultats.

D'autre part, les quatre paramètres dont les valeurs sont a priori imprévisibles sont estimés dans un tout petit domaine de variation comparé à leur domaine de variation possible (c.f. tableau 4.4). L'impact de l'acquisition de chaque innovation soit par création soit par diffusion, *InnovationImpact*, est très faible. Cette valeur s'accorde avec le paramètre fixé du nombre total d'innovations autorisées dans le système *MaxInnovation* (c.f. section 3.2.3.8). Ensemble, ces deux paramètres permettent de produire une définition quantifiée qui donne sens à la notion d'innovation telle qu'elle est modélisée dans ce système.

À cette définition s'ajoutent les deux valeurs de paramètres liés à la création $P_{creation}$ et la diffusion $P_{diffusion}$ d'innovations. Ces deux paramètres représentent la probabilité qu'un échange entre deux individus d'un même point de peuplement ou de deux points de peuplement différents concoure à l'acquisition d'une innovation. Des lois Binomiales permet de synthétiser cette probabilité individuelle à l'échelle du point de peuplement (c.f. sections 3.2.3.4 et 3.2.3.5). D'après l'ensemble de paramétrages optimaux pour le calibrage, les probabilités d'acquérir une innovation par la création ou par la diffusion sont très faibles, ce qui était attendu. De plus, les domaines de variabilité optimaux sont extrêmement réduits. Le modèle semble donc très sensible à ces deux paramètres. Par ailleurs, le domaine de variabilité de la probabilité de création est supérieur à celui de la probabilité de diffusion, ce qui signifie que dans le modèle, la création d'innovation par l'interaction entre deux individus d'un même point de peuplement est plus facile

Paramètre	Domaine d'exploration	Domaine de variation dans le front de Pareto
R_{max}	[1; 40000]	[10090; 10465]
$InnovationImpact$	[0; 2]	[7, 7.10^{-3} ; 8, 4.10^{-3}]
$P_{creation}$	[0; 1]	[1, 1.10^{-6} ; 1, 3.10^{-6}]
$P_{diffusion}$	[0; 1]	[6, 7.10^{-7} ; 6, 9.10^{-7}]
$DistanceDecay$	[0; 4]	[0, 66; 0, 75]
Espace	320000	$4, 7.10^{-16}$

Tableau 4.4 – Comparaison du domaine d'exploration de l'algorithme de calibrage et du domaine de variation dans le front de Pareto des paramètres de SimpopLocal

que la diffusion d'innovation entre deux individus de points de peuplement différents. En d'autres termes la création semble plus facile que la diffusion, ce qui paraît contre-intuitif (PENNISI, 2010), mais s'explique par un effet de taille. Ces probabilités liées à l'innovation s'expriment au niveau des individus qui interagissent alors que les effets de ces interactions se calculent et s'observent au niveau des points de peuplement. L'ensemble des individus interagissant pour la création d'innovation ne dépasse pas le seuil de taille du point de peuplement considéré, alors que l'ensemble des individus interagissant pour la diffusion représente potentiellement l'ensemble du système de points de peuplement. Aussi, si l'on résume par des lois binomiales ces probabilités à l'échelle du point de peuplement, sa probabilité d'innover par création est plus faible que sa probabilité d'innover par acquisition d'une innovation diffusée : le nombre d'interactions comptabilisées est beaucoup plus grand dans le deuxième cas. Cet effet d'échelle et de taille de la population considérée explique le décalage contre-intuitif entre les deux valeurs de probabilité. Les valeurs absolues de ces deux paramètres ne sont donc pas comparables. Cet effet est illustré dans la suite de ce chapitre par le graphique de la figure 4.9 qui montre clairement que le nombre d'innovations acquises par diffusion est largement plus grand que le nombre d'innovations acquises par création.

Enfin, le paramètre de dissuasion des interactions par la distance *DistanceDecay* présente une gamme de valeurs qui n'est pas en contradiction avec la littérature, par exemple celles estimées lors d'applications empiriques du modèle gravitaire pour des interactions interurbaines (BACCAÏNI et PUMAIN, 1998). Nous ne disposons bien évidemment pas d'estimations pour des périodes plus anciennes, mais on peut supposer que si la propension à la mobilité a augmenté au cours du temps, il en est de même des distances à parcourir d'une ville à l'autre pour acquérir des innovations significatives, ce qui rend la comparaison sinon pertinente, du moins un peu rassurante.

Les multiples exécutions de chaque paramétrage parmi les 29 finalement sélectionnés

pour le calibrage du modèle montrent que chacun donne de bons résultats et une variabilité acceptable des sorties de simulation. Les figures 4.4 et 4.5 illustrent des sorties obtenues par la simulation du paramétrage mis en évidence en caractères gras dans le tableau 4.3. Le choix de ce paramétrage n'est pas anodin, il représente le paramétrage qui offre le meilleur compromis sur les trois objectifs à la fois, c'est-à-dire le paramétrage qui offrent les meilleurs scores possibles sur les trois objectifs à la fois (le point vert sur la figure 4.1.2.4). La figure 4.4 montre l'évolution de la distribution des tailles de points de peuplement pendant une simulation. Cette évolution correspond à ce qui est attendu du modèle : une organisation progressive et continue vers une distribution de plus en plus hiérarchisée du système de peuplement. Ce résultat est très robuste si l'on considère la figure 4.5 qui illustre la faible variabilité de cette distribution en fin de simulation sur 100 réplications.

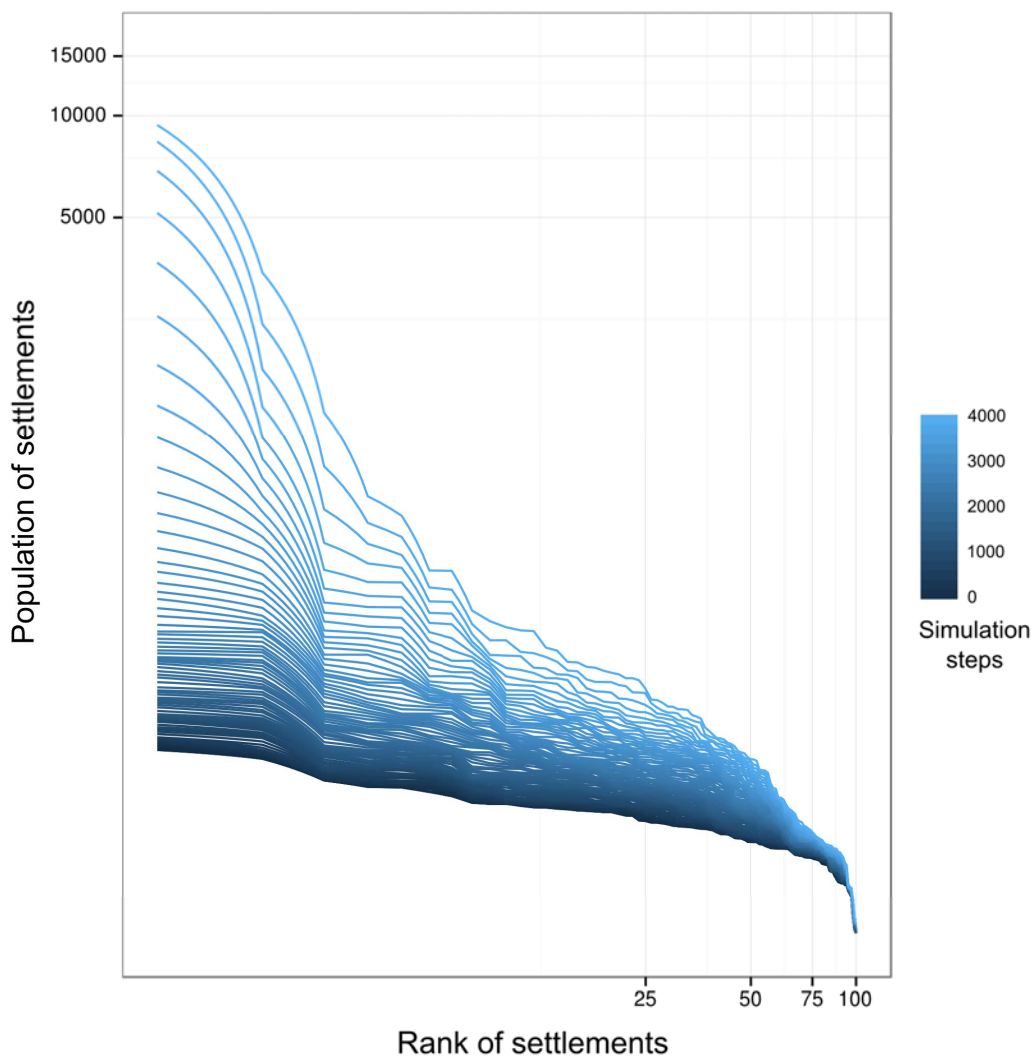


Figure 4.4 – Évolution de la distribution Rang-Taille des points de peuplement pendant une simulation d'un des meilleurs paramétrages calibrés

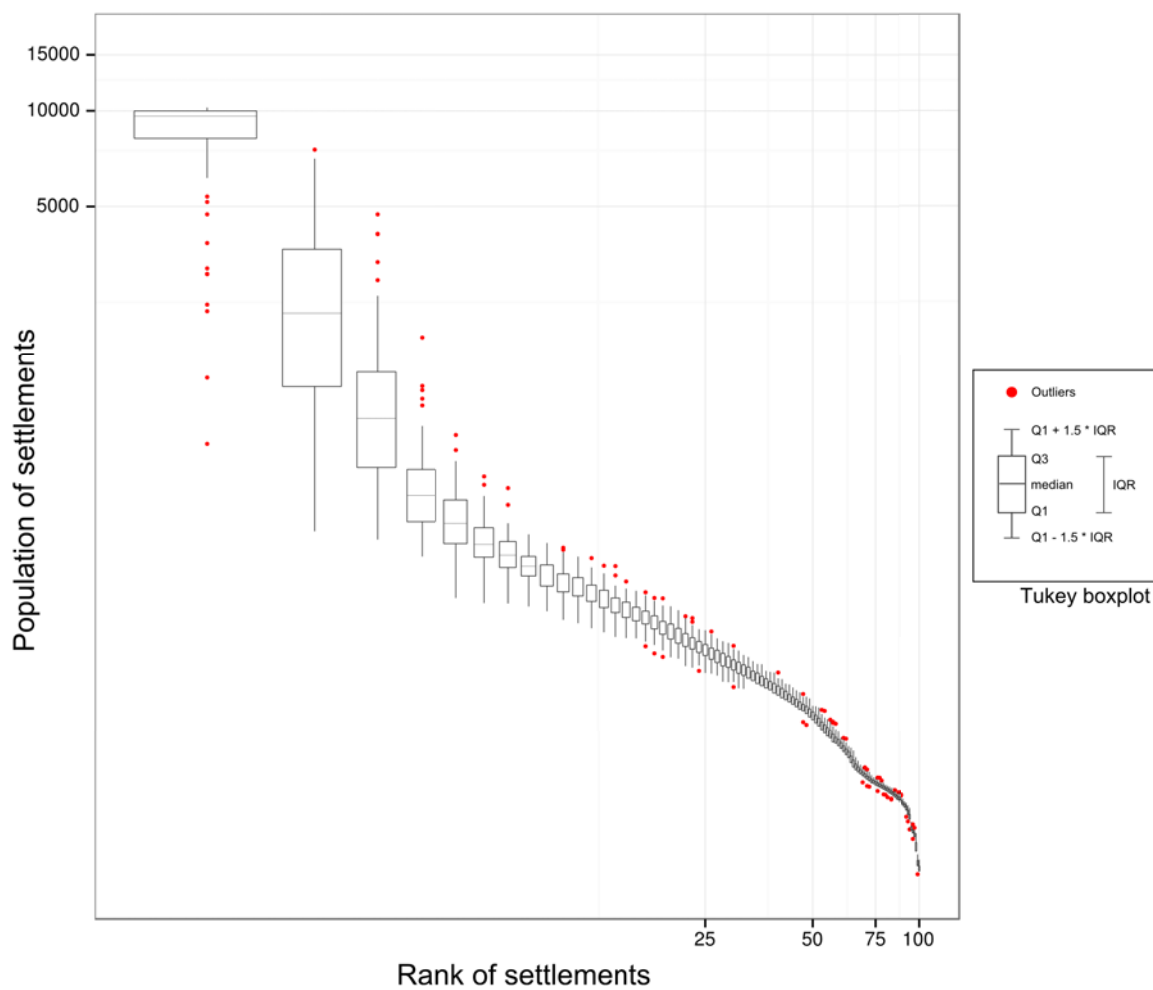


Figure 4.5 – Variabilité de la distribution finale Rang-Taille des points de peuplement sur 100 simulations d'un des meilleurs paramétrages calibrés

4.1.4 Une méthode de calibrage efficace

La procédure automatisée de calibrage présentée dans cette partie a été appliquée pour la première fois sur le modèle multi-agent SimpopLocal et a fourni des résultats très convaincants. Avec cinq paramètres dont on ne pouvait pas donner d'estimation *a priori*, il aurait été très difficile de trouver de façon manuelle (par essais-erreurs) ces estimations. En reformulant ce problème de calibrage en un problème d'optimisation, la procédure de calibrage automatisée a permis de trouver des paramétrages qui reproduisent très bien les faits stylisés recherchés et résumés par les trois objectifs de la fonction d'évaluation (ou de fitness) pour le calibrage. Ces résultats ont permis de marquer une avance décisive dans l'évaluation du modèle SimpopLocal : il est prouvé que ce modèle, dans sa parcimonie de mécanismes, est capable d'engendrer de façon très satisfaisante des évolutions plausibles de systèmes de peuplement, y compris l'émergence d'un système urbain hiérarchisé.

Pour acquérir une confiance encore plus forte dans les résultats de cette expérience de calibrage, il serait intéressant de réaliser une analyse de sensibilité locale, autour des solutions de paramétrage trouvées par l'algorithme de calibrage automatique, pour tester la robustesse des comportements de calibrage. L'expérimentation présentée en section 4.3 permettra d'aller encore plus loin dans ce sens. Cependant, le fait que l'ensemble des paramétrages se situe dans un espace très restreint de l'espace des domaines de variations possibles tend à confirmer la robustesse des solutions proposées par l'algorithme.

Cette expérimentation pour le calibrage du modèle illustre le potentiel de cette nouvelle approche d'exploration des dynamiques de modèles multi-agents. Elle peut s'avérer d'abord très utile pour expérimenter d'autres modèles en sciences sociales. Le protocole et les outils ont été conçus pour être indépendants du modèle à l'étude et sont généralisables et réutilisables par la communauté des modélisateurs multi-agents. Ils sont libres et accessibles en ligne¹². Ils font maintenant partie de la plateforme d'exploration de modèles géographiques SimProcess, objet de la thèse de REY COYREHOURCQ (2014). Cette méthode, originellement développée et testée sur le modèle SimpopLocal, est déjà appliquée à d'autres modèles géographiques de simulation tels que le modèle MARIUS (Modélisation Appliquée à la Russie Impériale et l'ex-Union Soviétique)(COTTINEAU et CHAPRON, 2013) ou le modèle MicMac pour l'étude des stratégies de gestion de la diffusion d'épidémies (REY COYREHOURCQ, 2014). De plus, ce travail ouvre la voie à d'autres protocoles d'exploration. La procédure peut être utilisée pour tester la plausibilité de nouvelles règles ou mécanismes à introduire dans le modèle pour simuler des dynamiques spécifiques et ciblées. Cette approche est en cours de développement sur la plateforme SimProcess sous la forme des outils SimPuzzle et Janet, grâce à son application au projet MARIUS. La procédure peut aussi être utilisée dans une approche plus globale de l'exploration qui

12. <http://iscpif.github.io/simpoplocal-epb/>

pourrait s'apparenter à une analyse de sensibilité. Cette dernière ouverture est présentée en troisième partie de ce chapitre, dans la section 4.3, mais auparavant nous devons présenter de manière plus détaillée quelques-uns de nos résultats de simulation.

4.2 Interprétation des comportements du modèle SimpopLocal

Quelques résultats significatifs de sorties d’une simulation du modèle SimpopLocal sont présentés dans cette partie. Ils illustrent le type de comportements qui était recherché lors de la conception du modèle. Des illustrations de sorties de simulations sont d’abord présentées à l’échelle du système de peuplement, avant de s’attacher à l’échelle méso-géographique et de montrer des trajectoires démographiques typiques de points de peuplement.

Le paramétrage choisi (c.f. tableau 4.5) est un paramétrage issu du calibrage du modèle. Il a déjà été sélectionné pour les figures 4.4 et 4.5. Le modèle étant stochastique comme nous l’avons illustré dans l’expérience de calibrage, un même paramétrage peut conduire à des résultats différents d’une simulation à l’autre, si différentes graines aléatoires sont utilisées. Pour cet exercice nous nous consacrons à l’exploration des sorties d’une unique simulation, celle dont la figure 4.4 est issue, choisie parmi 100 simulations parce qu’elle présente des comportements très proches de ceux recherchés lors de la construction du modèle. Le tableau 4.5 donne les valeurs exactes du paramétrage simulé et de la graine aléatoire utilisée. Ces renseignements sont donnés pour permettre la reproductibilité de nos expériences : les sorties de simulation présentées ici sont reproductibles si les paramètres donnés sont utilisés avec le code source publié du modèle. Les conditions d’initialisation, de simulation et d’arrêt de simulations sont les mêmes que celles définies pour l’expérimentation de calibrage et ont été présentées dans la section 3.2.5.

4.2.1 Illustrations de sorties d’une simulation à l’échelle du système de peuplement

La simulation présentée s’est arrêtée à 3909 pas de simulation, juste avant que la population totale du système n’atteigne les 30000 habitants. Le plus grand point de peuplement présente 9497 habitants. La cause de l’arrêt de la simulation est le nombre total d’innovations, car au dernier pas de simulation 10000 innovations avaient été engendrées. Cet expérience montre que ce critère d’arrêt, et plus généralement le calibrage de ce paramètre *MaxInnovation*, a une influence très importante sur les simulations, et ne doit pas être ignoré (c.f. section 3.2.3.8).

La figure 4.6 donne une cartographie de l’environnement de simulation à l’état initial et à l’état final. Cette cartographie permet de localiser les endroits où les écarts de taille démographique entre les points de peuplement se sont le plus creusés. À l’initialisation, les plus gros points de peuplement étaient répartis de façon à peu près christallérienne

Paramètre	Paramétrage
R_{max}	10259, 331894632433
r_{growth}	2%
$InnovationImpact$	0, 007879556611500305
$P_{creation}$	1, 2022185310640896.10 ⁻⁶
$P_{diffusion}$	7, 405303653131592.10 ⁻⁷
$DistanceDecay$	0, 6882107473716844
$InnovationLife$	4000
$MaxInnovation$	10000
$P_{catastrophe}$	mécanisme inactif
$Pop_{Catastrophe}$	mécanisme inactif
$R_{Catastrophe}$	mécanisme inactif
graine aléatoire	-6863419716327549772

Tableau 4.5 – Paramétrage du modèle SimpopLocal pour la simulation interprétée

sur le territoire simulé¹³. Pourtant, en fin de simulation, la localisation des plus grands points de peuplement n'est pas aussi bien dispersée sur le territoire et la répartition initiale paraît avoir été bouleversée. En effet, les plus grands points de peuplement semblent plutôt regroupés dans une faible portion du territoire (voir alignés sur une diagonale Nord-Ouest/Sud-Est), alors que la théorie des lieux centraux voudrait les voir dispersés de façon régulière sur le territoire. Ceci semble indiquer que les mécanismes de répartition de la croissance ne sont peut-être pas encore assez bien modélisés pour permettre de reproduire une configuration représentative de la répartition spatiale des tailles de points de peuplement. Le modèle ne simule que des mécanismes d'interaction de type coopération/diffusion, l'ajout d'un mécanisme d'interaction de type compétition pourrait aider à mieux simuler la répartition de la croissance.

Le modèle parvient toutefois à simuler l'amplification des écarts de tailles entre point de peuplement qui a conduit à la hiérarchisation du système, illustrée par la figure 4.4. La pente de l'ajustement linéaire de la distribution rang-taille passe de 0,2 à 0,9 en près de 3909 ans (c.f. figure 4.7). Alors qu'au début de simulation 10% des points de peuplement réunissent seulement 14% de la population totale, en fin de simulation 5% des points de peuplement réunissent près de 54% de la population. La hiérarchisation finale du système est donc très forte et marquée par une macrocéphalie des 5 plus grands points de peuplement.

La figure 4.8 montre l'évolution de la population totale du système au cours de la simulation. Le graphique de gauche montre que cette croissance est régulière, mais ne

13. La méthode de construction de cet état initial est détaillée dans l'annexe C

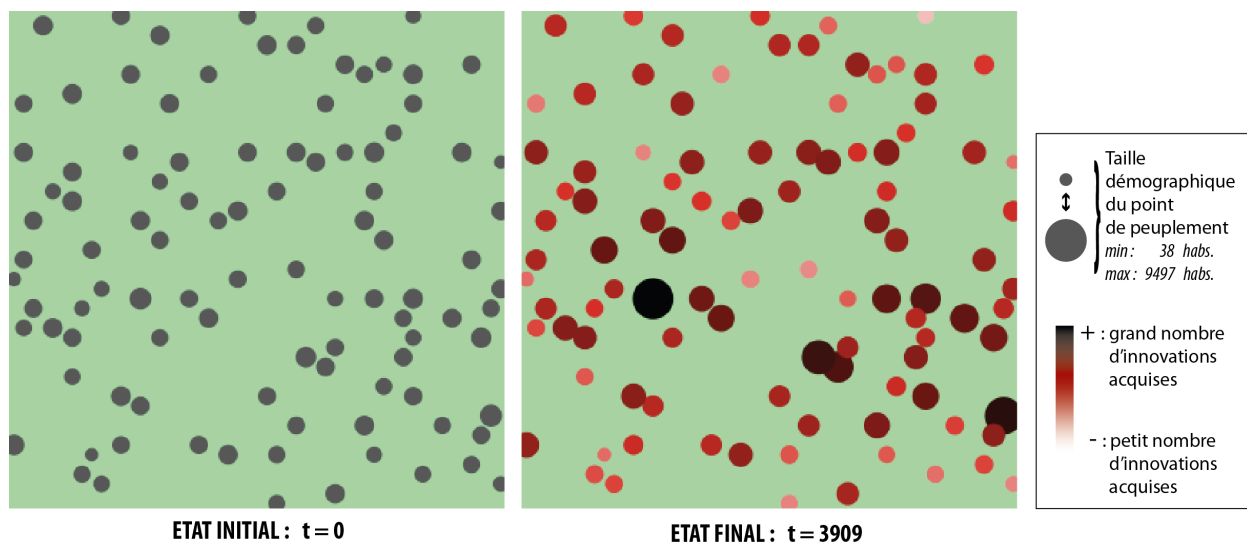


Figure 4.6 – Cartographie du système de points de peuplement à l'état initial et à l'état final

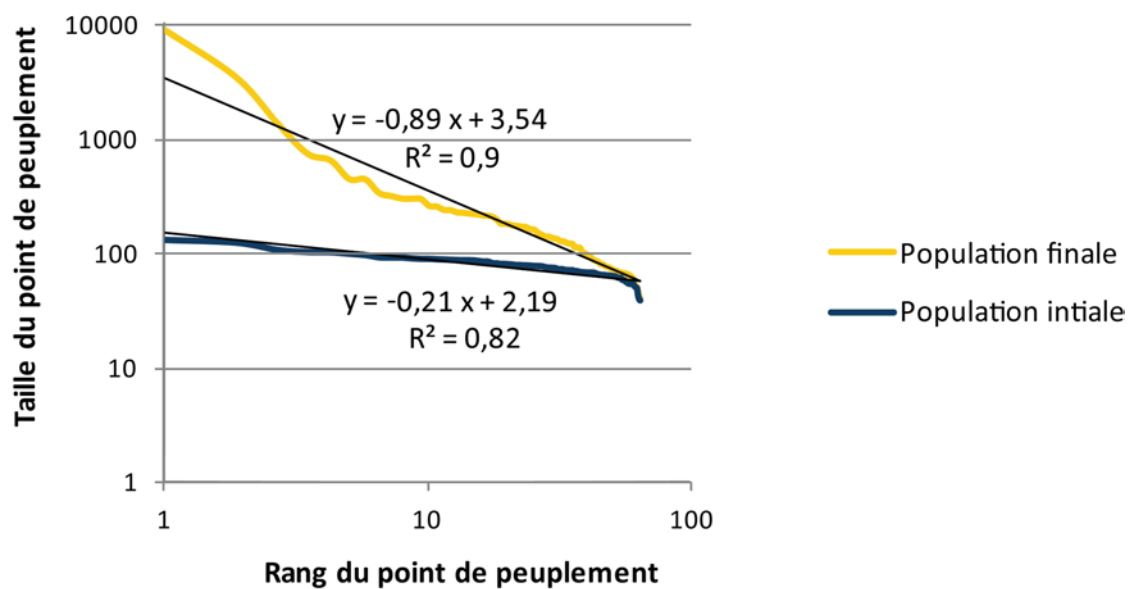


Figure 4.7 – Ajustement linéaire des pentes des distributions rang-taille des points des peuplement du système à l'initialisation et en fin de simulation

permet pas de conclure quant à sa forme. Si on fait l'hypothèse que cette croissance est de type exponentiel ($R^2 = 0,74$ pour l'ajustement $y = 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(2 \cdot 10^{-4} \cdot x)$), le graphique semi-logarithmique de droite permet de visualiser directement à chaque moment de la simulation quel est le taux de variation de la population : la pente montre la dérivée de la courbe du graphique de gauche, c'est-à-dire l'intensité de la croissance. Le développement général du système de peuplement présente ainsi une accélération finale de la croissance au cours des 500 derniers pas de simulation. Cette accélération rappelle les dynamiques de croissance de système lors des phases de changement de régimes tels qu'ils ont été présentés dans la section 1.4. Comme le modèle SimpoLocal a été conçu pour étudier les dynamiques d'émergence des systèmes urbains, ce résultat de la simulation qui reconstruit une telle dynamique est extrêmement satisfaisant.

Par ailleurs, le taux de croissance moyen annuel du système¹⁴ sur toute la période simulée est de 0,036%. Ce taux de croissance moyen annuel est lui aussi très satisfaisant au regard des données empiriques qui indiquent qu'un taux de croissance moyen annuel de 0,02% est représentatif des périodes proto-urbaines (BAIROCH, 1985; RENFREW et POSTON, 1979). Ce taux est le reflet des trois objectifs pour le calibrage du modèle, pourtant cette dynamique globale de système n'était pas prédéterminée par les objectifs. L'objectif de population (le plus grand point de peuplement doit approcher les 10000 habitants) et l'objectif de temps (la simulation doit durer près de 4000 pas de simulation, i.e. 4000 années simulées) permettaient de définir l'ordre de grandeur de la dynamique du plus grand point de peuplement. Cette dynamique recherchée pour le plus grand point de peuplement est donc caractérisée par un taux de croissance moyen annuel de près de 0,1%. Le troisième objectif (une distribution log-normale des tailles de points de peuplement en fin de simulation) pondère cette dynamique définie à une échelle micro-géographique pour l'ensemble du système. Finalement, la dynamique globale qui en a résulté est extrêmement satisfaisante.

La figure 4.9 montre l'évolution du nombre d'innovations créées et diffusées dans le système de peuplement au cours de la simulation. À gauche, l'évolution du nombre des innovations croît de façon régulière avec le déroulement de la simulation. Au cours de la simulation le nombre d'innovations acquises par diffusion est toujours plus grand que le nombre d'innovations acquises par création. Ce constat illustre l'effet de taille lié au mécanisme d'acquisition d'innovations déjà commenté en section 4.1.3.2 qui ne permet pas de comparer les valeurs des deux paramètres $P_{diffusion}$ et $P_{creation}$. Suivant l'hypothèse que ces courbes sont aussi de type exponentiel, le graphique de droite présente les logarithmes de l'évolution du nombre d'innovations de chaque type. Il permet de visualiser les intensités de croissance de chaque contingent d'innovations. Le taux de croissance du nombre des

14. Le système simulé est passé d'une population initiale de 7312 habitants à une population finale de 29433 habitants en 3909 années

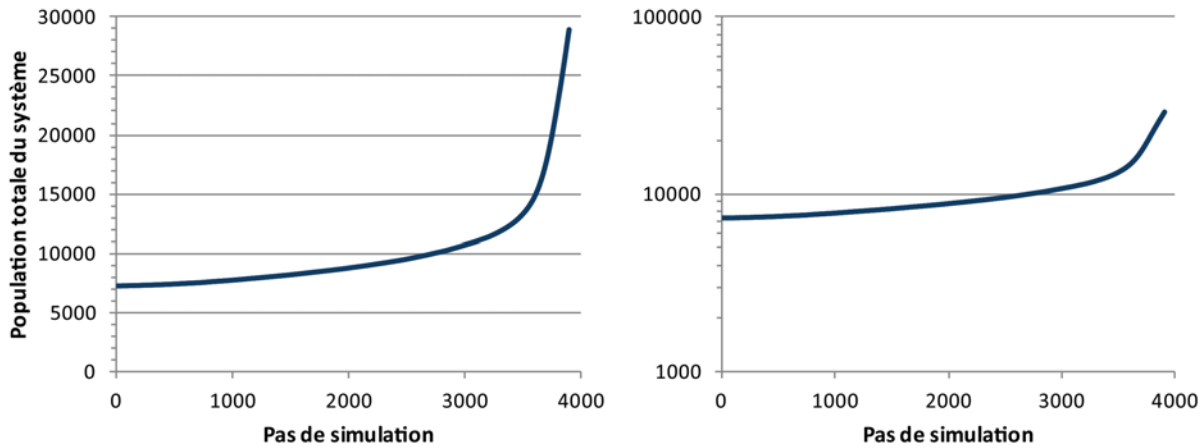


Figure 4.8 – Évolution de la population totale (en nombre d’habitants) du système simulé au cours de la simulation, sur graphique arithmétique à gauche et semi-logarithmique à droite

innovations s’accélère très fortement en début de simulation, puis se ralentit pour finalement reprendre sur les 500 derniers pas de simulation, illustrant probablement un effet de sélection hiérarchique dans le système qui accentue la capacité de création et de diffusion de ses plus grandes unités. Les innovations étant le moteur de la croissance, ce constat est cohérent avec les évolutions démographiques enregistrées dans cette simulation. Ainsi, l’indice de corrélation à l’état final entre la population et le nombre d’innovations acquises (par création et diffusion) pour chaque point de peuplement est de 0,9.

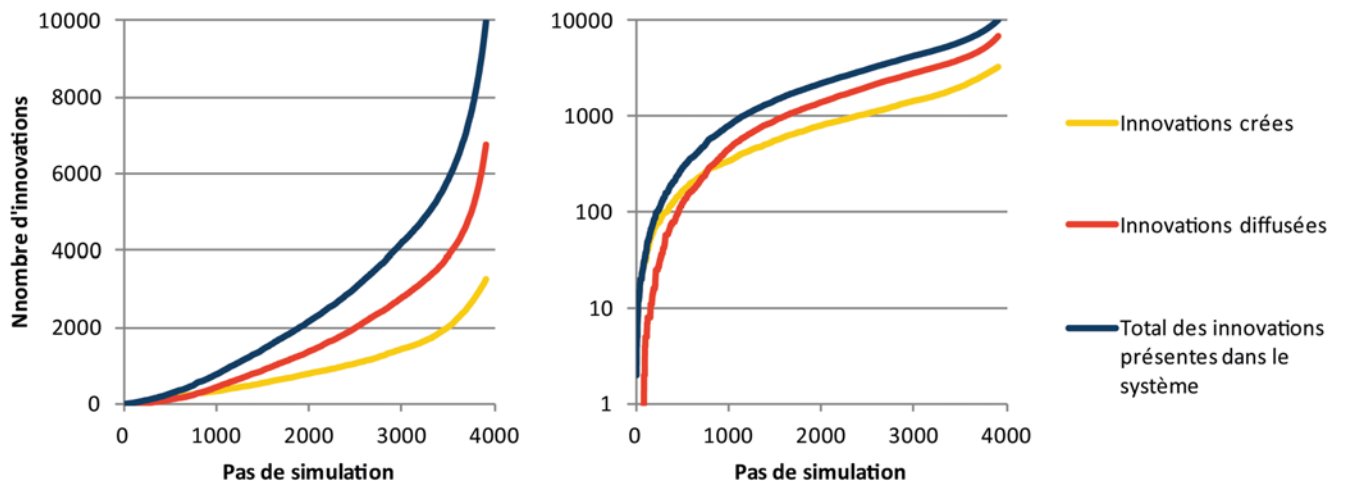


Figure 4.9 – Évolutions des nombres d’innovations créées et diffusées au cours de la simulation (échelle arithmétique à gauche, échelle logarithmique à droite)

4.2.2 Illustrations de sorties d'une simulation à l'échelle des points de peuplement

L'un des enjeux des modèles de simulation de croissance de système de villes est de générer des dynamiques qui soient représentatives à la fois à l'échelle macro-géographique du système mais aussi à l'échelle méso-géographique des entités constitutives du système, les noyaux de peuplements (SANDERS, 2006). Il est donc nécessaire de s'assurer que l'évolution démographique de chaque point de peuplement suit une trajectoire cohérente au sein du système : pas de fluctuation chaotique, stabilité relative du classement hiérarchique, etc. L'outil TrajPop¹⁵, développé par R. Cura, permet de résumer et de différencier les types de trajectoire de villes dans un système de peuplement. La méthode compare d'abord les profils d'évolution de population grâce à une analyse factorielle des correspondances (avec distance du χ^2) qui génère une matrice de distance entre les trajectoires des points de peuplement. Sur cette matrice est ensuite appliquée une classification ascendante hiérarchique (avec la méthode de Ward, qui tend à minimiser la variance intra-classe et maximiser la variance inter-classe). Le nombre de classes de discrétisation est choisi à partir de l'arbre généré par cette classification. Les graphiques en sortie de TrajPop permettent d'analyser ces classes de trajectoires de points de peuplement.

La figure 4.10 montre le résultats du traitement statistique TrajPop avec une partition en 5 classes. La figure 4.11 présente les types de profils dérivés de la classification. En haut : la trajectoire de la population moyenne de chaque classe de points de peuplement. En bas : l'évolution relative du poids moyen de la classe dans le système. Les graphiques semi-logarithmiques permettent à la fois de comparer sur le premier graphique les évolutions des intensités de croissance de chaque classe (représentées par la pente), mais aussi de visualiser immédiatement sur le deuxième les différences dans l'évolution des poids relatifs des classes dans le système. À ce niveau méso-géographique, les résultats de simulation sont satisfaisants, car conformes à de très nombreuses observations empiriques (PUMAIN et SANDERS, 2013) : les trajectoires simulées de points de peuplements sont très régulières, elles ne présentent ni fluctuations ni instabilités dans les dynamiques démographiques. La hiérarchie du système reste stable et le processus de hiérarchisation s'amplifie au cours de la simulation : les classes regroupant les plus grands points de peuplement dès le début de la simulation prennent de plus en plus de poids dans le système de peuplement au détriment des classes de points de peuplements de plus petite taille, avec une accélération au cours des 500 dernières années, qui correspond à celle simulée pour la population totale. Ce résultat montre que le modèle est capable de simuler des trajectoires démographiques qui font preuve de cohérence à la fois à l'échelle macro-géographique du système mais aussi à l'échelle méso-géographique de l'unité de peuplement.

15. <http://trajpop.parisgeo.cnrs.fr/>

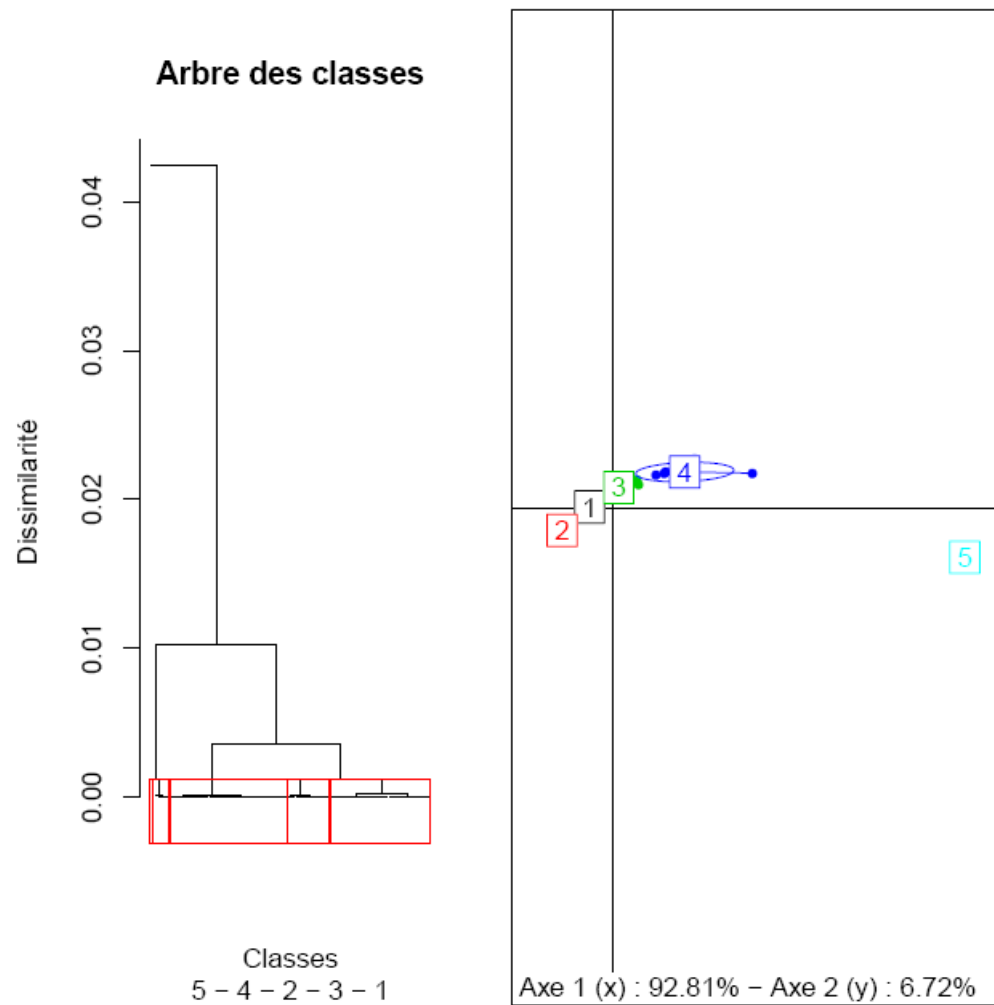


Figure 4.10 – Résultats de la classification ascendante hiérarchique sur les trajectoires des points de peuplement lors d’une simulation du modèle SimpopLocal

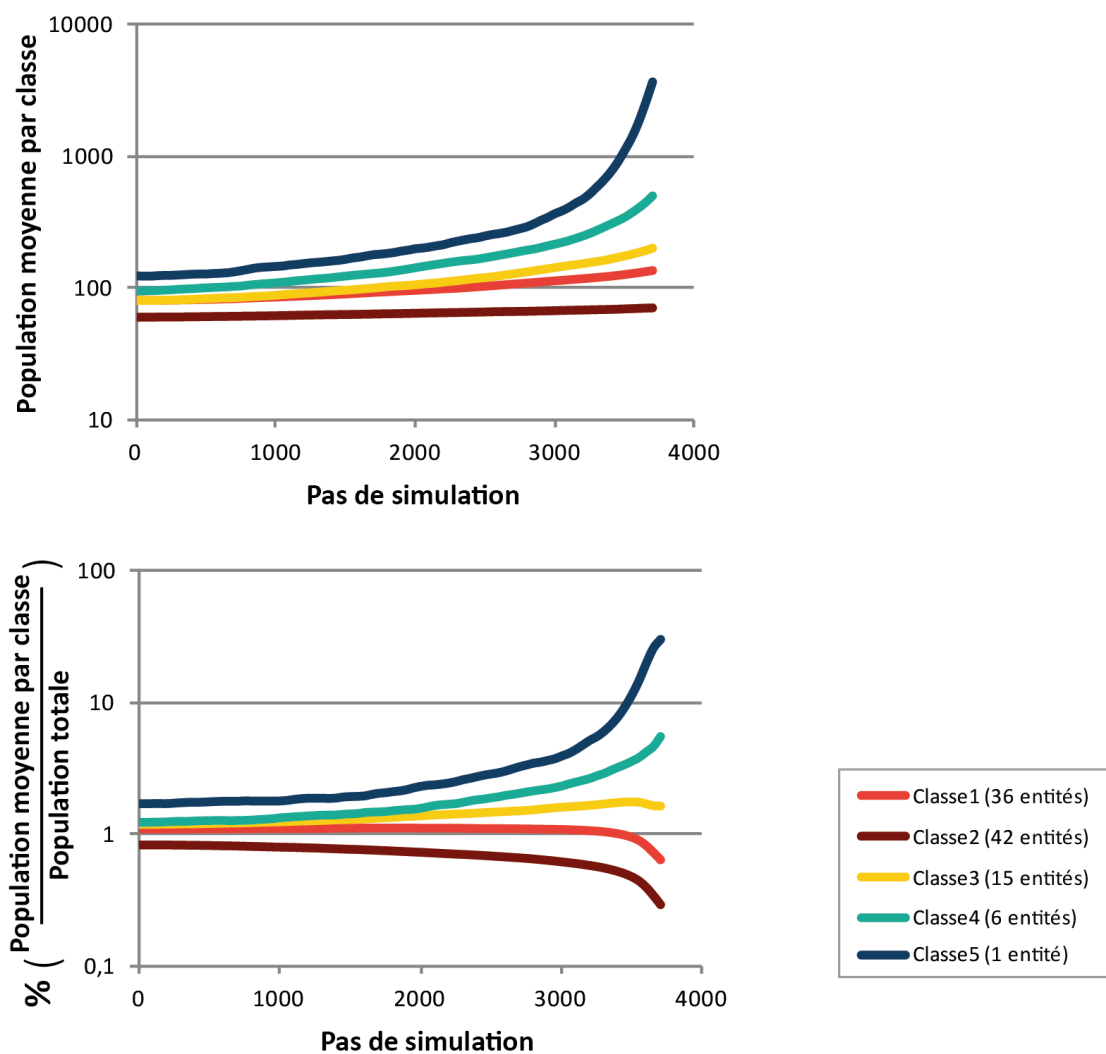


Figure 4.11 – Trajectoires des points de peuplement par classes (5) lors d’une simulation du modèle SimpopLocal

L'ensemble de ces résultats indiquent que le modèle SimpopLocal permet de générer par la simulation les principales caractéristiques attendues de croissance des systèmes de peuplement à la fois à l'échelle du système de peuplement et à l'échelle des points de peuplement. Les dynamiques sont cohérentes à toutes les échelles d'observation. Ces résultats ont par ailleurs aidé à identifier une potentielle faiblesse du modèle, l'insuffisante vraisemblance de la répartition spatiale de la croissance, ce qui permettra d'orienter les futurs développements du modèle.

4.3 Une analyse de sensibilité innovante (*EP algorithm*)

4.3.1 L'utilisation d'algorithmes d'optimisation pour l'exploration globale de modèles multi-agents

4.3.1.1 L'exploration des comportements des modèles multi-agents

Les modèles multi-agents sont largement utilisés en sciences sociales pour leur capacité à produire des dynamiques globales à partir de règles d'interactions à l'échelle des agents. Pour ces modèles, l'exploration des comportements simulés est une part importante du processus de modélisation. Elle peut aider à révéler les comportements qui offrent une meilleure compréhension de l'émergence de dynamiques globales à partir des interactions à l'échelle micro-géographique. Les plans d'expérimentation (les plans complets, les explorations aléatoires par la méthode de Monte-Carlo, etc.) et les analyses de sensibilité globales (SALTELLI, CHAN, SCOTT et al., 2000) sont des méthodes communément utilisées pour explorer les modèles. Elles ne sont cependant pas bien adaptées à l'exploration des modèles multi-agents. La plupart de ces méthodes sont conçues pour des modèles aux dynamiques linéaires, à faible nombre de paramètres ou déterministes et prennent peu en compte les non-linéarités, les interactions entre de multiples mécanismes ou la stochastichité, qui sont généralement présentes dans les modèles multi-agents. Ces approches sont très difficiles à mettre en œuvre sur des modèles à plus de 5 paramètres continus : le nombre d'expérimentations nécessaires pour obtenir une vue globale et suffisamment détaillée de l'espace des paramètres est immense, demande un temps de calcul phénoménal et produit une très grande masse de données impossible à stocker ou traiter. C'est pourquoi de nouvelles méthodes sont actuellement en développement pour traiter spécifiquement du problème de l'exploration des modèles multi-agents.

MINER (2010) propose d'utiliser des algorithmes d'apprentissage pour étudier les relations entre le paramétrage et les comportements à l'échelle du système. Cette approche est prometteuse mais présente des inconvénients clairement identifiés par les auteurs : le système simulé ne doit pas présenter plus de 4 paramètres à étudier et devrait faire preuve de fortes corrélations entre valeurs de paramètres et comportements simulés. STONEDAHL (2011) présente un cadre général pour l'utilisation des algorithmes d'optimisation dans l'étude des comportements des modèles multi-agents. Comme dans l'utilisation que nous en avons faite pour le calibrage du modèle SimpopLocal, cette approche est conçue pour résoudre des problèmes inverses pour lesquels des paramétrages produisant des comportements ciblés sont identifiés. Cependant le petit espace de paramétrage, identifié par cette méthode et qui produit des comportements de modèle calibré, ne révèle qu'une vue

très étroite de l'espace de paramétrage. Un calibrage du modèle est primordial, il permet d'affirmer que les comportements pour lesquels le modèle a été développé peuvent être engendrés à partir des hypothèses posées, mais une vision plus globale de l'espace de paramétrage et des comportements possibles du modèle peut être tout autant instructive. Elle peut révéler les aires de paramétrage dans lesquelles le modèle produit des comportements attendus ou recherchés et les aires qui au contraire produisent des comportements inattendus. Elle aide le modélisateur à identifier les conditions nécessaires à l'émergence du comportement recherchés, ou au contraire les hypothèses de simulation qui ne produisent pas les effets escomptés.

4.3.1.2 Une vue globale de l'espace de paramétrage

Pour obtenir une vue plus globale de l'espace de paramétrage, une méthode d'analyse de comportement de modèle a été conçue¹⁶. Cette nouvelle méthode expose la sensibilité du calibrage du modèle aux variations d'un paramètre, indépendamment des autres paramètres. La méthode consiste à calculer la meilleure qualité de calibrage qui peut être obtenue en fixant la valeur d'un paramètre et en laissant tous les autres paramètres libres. Pour une large gamme de valeurs du paramètre à l'étude, les valeurs des autres paramètres sont optimisées par une technique similaire à celle utilisée pour le calibrage automatique et décrite dans la section 4.1, dans l'objectif de se rapprocher au plus près du comportement ciblé par le calibrage. La qualité du meilleur calibrage possible peut donc être détaillée en fonction de la valeur prise par le paramètre testé. Les graphiques ainsi produits sont appelés *profils de calibrage* et décrivent l'influence d'un paramètre sur le calibrage du modèle. L'algorithme de cette méthode est appelé algorithme EP ou *Exploration Profile algorithm*.

Les apports de l'étude des profils de calibrage pour tous les paramètres d'un modèle sont multiples. D'abord ces profils permettent de tester l'influence des mécanismes sur la capacité du modèle à produire des dynamiques ciblées. Il peuvent permettre ainsi d'identifier les mécanismes superflus ou qui n'ont aucune influence sur le calibrage du modèle : quelque soit la valeur prise par le paramètre clé de ce mécanisme, soit il est possible de compenser par les autres paramètres du modèle pour obtenir un calibrage jugé acceptable, soit la valeur du paramètre n'a aucune influence sur le comportement du modèle. Les profils peuvent donc être de bons outils d'aide à la réduction du nombre de paramètres d'un modèle dans une approche parcimonieuse de la modélisation. Les profils aident aussi à estimer les bornes des *domaines de calibrage absolus* des paramètres du mo-

16. Un article sur cette nouvelle approche de l'exploration de modèle multi-agents et son application au modèle SimpopLocal est en cours de rédaction pour une soumission au journal JASSS : "A new method to evaluate models : the exploration profile (EP) algorithm", R. Reuillon, C. Schmitt, R. De Aldama et J.-B. Mouret

dèle étudié. Ces bornes sont définies comme les bornes de paramétrage au-delà desquelles il est impossible de correctement calibrer le modèle, quelque soit la compensation sur les autres paramètres du modèle. Ce sont donc des bornes nécessaires de paramétrage pour le calibrage du modèle.

4.3.1.3 L'algorithme des profils d'exploration (*EP algorithm*)

Pour produire de tels profils de calibrage, une approche naïve consisterait à exécuter un calibrage entier pour chaque valeur de paramètre. Cependant, comme nous l'avons constaté, les algorithmes de calibrage automatisé (c.f. section 4.1) sont très gourmands en temps de calcul, et rendraient une telle approche impossible. Pour résoudre ce problème, un algorithme spécifique a été développé. Cet algorithme d'optimisation converge directement vers le profil de calibrage dans son ensemble plutôt que sur un seul point de ce profil. Cette méthode a été inspirée de la méthode MOLE (MOURET et CLUNE, 2008), qui calcule des *cartes* de *fitness* (i.e. évaluation de la qualité de calibrage) du modèle en fonction des valeurs de deux paramètres. La nouvelle méthode proposée est conçue pour dessiner des profils de calibrage en fonction d'un paramètre à la fois et permet de déterminer le rôle du paramètre dans le calibrage du modèle.

L'algorithme des profils d'exploration se fonde sur des algorithmes évolutionnaires d'optimisation standards. Chaque paramètre est à l'origine d'une analyse (un profil) et chaque analyse est indépendante. Cet algorithme est décrit dans les détails dans un article proposé à la revue JASSS et est reporté en annexe B. L'idée générale de cet algorithme est de tester successivement de nombreux paramétrages différents et de ne conserver que ceux qui optimisent le calibrage pour un grand nombre de valeurs du paramètre à l'étude. Pour assurer l'exploration la plus large possible du domaine de définition du paramètre à l'étude, l'algorithme évolutionnaire qui génère les paramétrages à tester est constitué d'un mécanisme de pression vers la diversité des valeurs de paramétrage du paramètre étudié. L'algorithme se déroule selon les étapes suivantes :

1. Un premier ensemble de paramétrage à tester est généré.
2. Chaque paramétrage ainsi généré est testé et évalué selon la fonction d'évaluation ou *fonction de fitness* définie pour l'expérimentation.
3. Un algorithme de sélection élitiste est appliqué sur les paramétrages et leur évaluation : ne sont conservés que les paramétrages qui optimisent le calibrage pour une valeur donnée du paramètre étudié.
4. Cet ensemble des paramétrages sélectionnés donne une première (et très grossière) approximation du profil de calibrage du paramètre étudié.

-
5. Un nouvel ensemble de paramétrages à tester est généré à partir de l'ensemble des paramétrages déjà sélectionnés : cette génération est conçue pour à la fois tirer vers l'optimisation du calibrage pour chaque valeur de paramètre à l'étude mais aussi tester des paramétrages avec de nouvelles valeurs pour ce paramètre. Ce nouvel ensemble de paramétrages à tester est donc un compromis entre une tendance à l'exploration du domaine de variation et une exploitation des résultats d'exploration déjà obtenus.
 6. Avec ce nouvel ensemble de paramétrages, l'algorithme réitère le processus décrit à partir de la deuxième étape. Cette boucle est répétée jusqu'à la validation du critère d'arrêt de l'algorithme (tel que le nombre d'itérations, la stabilisation des paramétrages sélectionnés, etc.)

L'algorithme de profil de calibrage de modèle, au fur et à mesure des itérations successives, permet d'obtenir une approximation de plus en plus précise du profil de calibrage d'un paramètre, c'est à dire la meilleure *fitness* possible du paramétrage du modèle en fonction de la valeur du paramètre étudié.

4.3.2 Les profils de calibrage de six paramètres du modèle SimpopLocal

4.3.2.1 Application de la méthode au modèle SimpopLocal

L'algorithme de profil de calibrage étant en partie fondé sur la méthode de calibrage automatique présentée en première partie de ce chapitre, son application au modèle SimpopLocal est facilitée. Tout comme la méthode de calibrage automatique, la méthode des profils de calibrage repose sur une évaluation de la meilleure qualité du calibrage pouvant être obtenue par un paramétrage. La fonction d'évaluation ou *fitness* que nous allons choisir est inspirée de la fonction de fitness à trois objectifs définie pour le calibrage du modèle dans la section 4.1.2.3.

Cette première fonction de fitness testait chaque paramétrage sur 100 répliques en fonction de trois critères : un objectif de distribution, un objectif de population et un objectif de temps. Cette fonction de fitness était donc un vecteur à trois composantes, i.e. trois scores, un score pour chacun des trois objectifs. Le caractère multi-objectif de l'optimisation pour le calibrage du modèle avait produit un ensemble de paramétrages formant un front de Pareto (c.f. 4.1.3). Dans un premier temps, cette approche multi-objectif était plus intéressante qu'une approche par optimum unique (mono-objectif). En effet, un front de Pareto expose un ensemble de solutions différentes qui permettent de diversifier l'éventail de compromis possibles sur les objectifs. Cette diversité permet de

donner une première idée de l'influence des paramètres d'entrée sur le calibrage, et donc de mieux appréhender les comportements du modèle. En revanche, l'algorithme de calcul des profils de calibrage est intrinsèquement conçu pour identifier un ensemble déjà diversifié de paramétrages, distribués suivant la valeur d'un des paramètres du modèle. Mais pour ce faire, il impose d'utiliser une fitness mono-objectif.

Pour cette nouvelle exploration par profil de calibrage, il est donc nécessaire d'introduire un quatrième critère de sélection qui permettra de distinguer et sélectionner un unique paramétrage et de résumer la fonction de fitness multi-objectif en une fonction de fitness à seule valeur. Cette valeur permettra de noter la qualité du meilleur calibrage qui puisse être trouvé par optimisation pour une valeur de paramètre donné. Dans la section 4.1.3.2, nous avons sélectionné un unique paramétrage parmi les paramétrages du front de Pareto pour générer des illustrations du calibrage du modèle. Nous avons décidé de préférer le paramétrage du front de Pareto qui présentait le meilleur compromis sur les trois objectifs simultanément. Nous reprenons la même méthode pour la définition de la fonction de fitness de cette nouvelle expérimentation par profil de calibrage. Comme les scores sur les trois objectifs sont normalisés en une erreur relative (plus elle est proche de 0, plus l'erreur est faible), il est facile de les comparer entre eux. Ceci permet de définir un quatrième critère de sélection sur la comparaison de ces scores normalisés. Concrètement, pour chaque paramètre évalué, le pire score (le plus élevé) parmi les trois scores (sur les trois objectifs) est conservé, et l'algorithme de tri sélectionne le paramétrage qui présente le score le plus bas parmi ces pires scores. En choisissant ce nouveau critère de sélection, il a donc été possible de réduire l'évaluation de chaque paramétrage à une seule valeur, qui correspond donc à la pire (la plus haute) valeur du score des trois objectifs. Cette valeur, appelée *fitness* du paramétrage, est un bon indicateur de la qualité du calibrage offert par le paramétrage testé.

Pour analyser les profils de calibrage du modèle SimpopLocal, nous avons établi que tout paramétrage générant un calibrage évalué à moins de 10% d'erreur, i.e. avec une fitness inférieure à 0,1, est jugé comme bon. Ce seuil est indiqué sur les graphiques par une ligne grise. Les résultats de cette expérimentation montrent que ces seuils sont largement atteints. Cependant les savoirs et les données empiriques à l'origine des objectifs de calibrage (et donc des critères d'évaluation de la fitness du paramétrage) ne sont pas suffisamment précis pour qu'il soit justifiable d'opérer une discrimination plus forte (un seuil plus bas). Ce seuil permet néanmoins de chercher sur les profils de chaque paramètre *les bornes de paramétrage absolues*. Les bornes de paramétrage absolues définissent le domaine de variation du paramètre en dehors duquel il est impossible de correctement calibrer le modèle (i.e. de trouver des paramétrages qui génèrent des calibrages présentant moins de 10% d'erreur). Ce domaine est appelé *le domaine de validité de calibrage du paramètre*. L'algorithme des profils de calibrage produit des approximations successives de la courbe d'ajustement du profil en approximant par le haut (les moins bonnes fit-

ness), c'est-à-dire en trouvant de façon itérative des calibrages de plus en plus précis pour chaque valeur du paramètre. Étant donnée la dynamique de recherche de l'algorithme stochastique de calcul des profils de calibrage, plus les temps de calcul sont longs et plus l'estimation de la fitness pour chaque valeur de paramètre se précise. Comme les temps de calcul ne sont pas infinis, le profil calculé sous-estime donc l'optimisation possible de la fitness pour chaque valeur de paramètre. Par conséquent, les bornes de calibrage qui pourront être estimées par les profils de calibrage seront relativement plus strictes que les bornes réelles de calibrage pour chaque paramètre. En contre-partie, cet effet permet d'être très confiant sur les bornes de calibrage qui seront définies.

Des profils de calibrage ont donc été calculés pour les 5 paramètres étudiés sur le modèle SimpopLocal : R_{max} , $InnovationImpact$, $P_{creation}$, $P_{diffusion}$ et $DistanceDecay$ ainsi que pour les paramètres r_{growth} (fixé à 2% dans l'expérimentation de calibrage) et $InnovationLife$ (dont le mécanisme référant avait été rendu inopérant dans l'expérimentation de calibrage). Nous commencerons l'analyse des profils de calibrage par ces deux paramètres.

4.3.2.2 Le paramètre r_{growth}

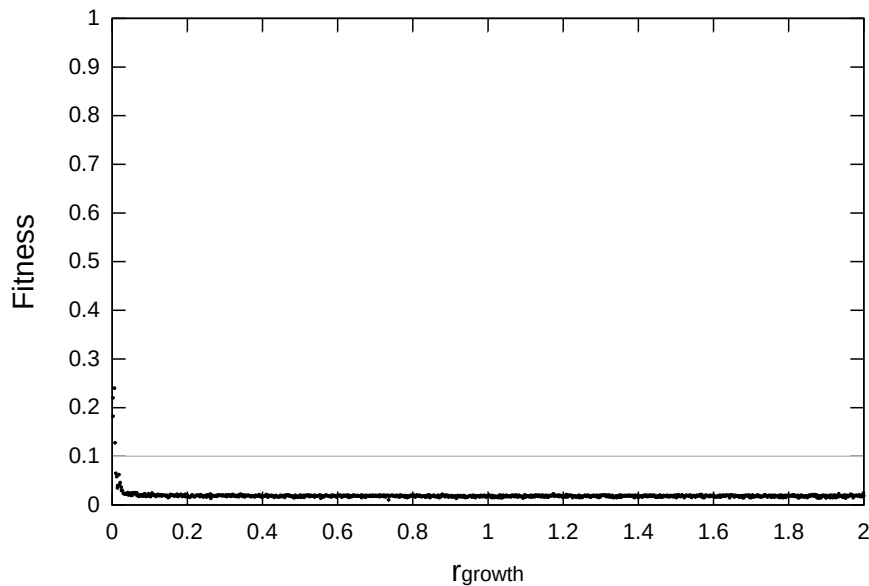


Figure 4.12 – Profil de calibrage du paramètre r_{growth} du modèle SimpopLocal

D'après le modèle de croissance de Verhulst, la valeur du paramètre r_{growth} désigne l'intensité maximale de croissance maximale qui peut être simulée pour chacun des points de peuplement (car cette valeur est la même pour tous). Cette intensité maximale ne peut être atteinte que lorsque la taille du point de peuplement est très petite devant le facteur limitant de l'équation (c.f. section 3.2.3.1), i.e. devant la variable R qui dépend du point de peuplement et du nombre d'innovations acquises par celui-ci. Par conséquent, si

les facteurs limitant R de chaque point de peuplement sont souvent atteints (ce qui est le cas pour les simulations de SimpopLocal), la croissance annuelle simulée est toujours nettement inférieure à la valeur fixée pour r_{growth} . Pour pouvoir insuffler au système de peuplement simulé une dynamique de croissance sur toute la durée de la simulation qui soit représentative de l'ordre de grandeur du taux de croissance moyen annuel de la période proto-historique (0,02%), nous avons émis l'hypothèse que le paramètre r_{growth} devait être fixé à une valeur très grande devant l'ordre de grandeur de ce taux observé. Pour le calibrage du modèle, nous avons donc choisi de fixer r_{growth} à 2%.

La figure 4.12 présente le profil de calibrage du paramètre r_{growth} . Ce profil de calibrage est singulier : pour pratiquement toutes les valeurs prises par le paramètre r_{growth} , le calibrage du modèle est estimé très bon, à moins de 3% d'erreur (i.e. avec un fitness à moins de 0,03). Ainsi l'influence de ce paramètre n'est pas significative sur le calibrage du modèle : quelque que soit la valeur prise par ce paramètre, il est possible de compenser sur la valeur des autres paramètres pour engendrer les dynamiques recherchées pour le calibrage. L'hypothèse de fixer la valeur de ce paramètre pour l'expérimentation du calibrage était donc bonne. En effet, si ce paramètre avait été introduit dans le génome de l'algorithme évolutionnaire (comme un des paramètres à optimiser), les solutions (les paramétrages) du front de Pareto auraient été dispersées dans l'espace de paramétrage. Une solution aurait été probablement proposée pour beaucoup de valeurs différentes de r_{growth} faisant varier avec elle les valeurs des autres paramètres.

Toutefois ce profil montre aussi que la valeur qui a été choisie pour fixer r_{growth} (0,02) n'est pas la plus judicieuse. Pour des valeurs de r_{growth} autour de 0,02, le calibrage du modèle est jugé bon mais n'est pas optimisé (fitness de 0,04 à 0,07, i.e. 4 à 7% d'erreur). En effet, pour toutes les valeurs supérieures à 0,02, le calibrage peut atteindre 0,02 de fitness (2% d'erreur). De plus, le calibrage du modèle devient très vite impossible pour des valeurs inférieures à 0,02 (la croissance du système n'est pas suffisamment stimulée pour reproduire les comportements recherchés). Il serait donc possible de définir un autre paramétrage de calibrage qui engendreraient des dynamiques encore plus proches de dynamiques recherchées si toutefois l'on fixait r_{growth} à une valeur supérieure à 0,02. Ce constat montre quand bien même que notre hypothèse de départ est juste (*le paramètre r_{growth} doit être fixé à une valeur très grande devant l'ordre de grandeur recherché du taux de croissance moyen annuel simulé*). Nous avons cependant sous-estimé cet effet ¹⁷.

Toutefois pour la suite de cette expérimentation nous avons décidé de fixer le paramètre r_{growth} à cette même valeur 0,02 choisie pour le calibrage du modèle. Ceci nous permettra

17. Ce constat souligne la difficulté pour interpréter ce paramètre de l'équation de Verhulst. Le paramètre r_{growth} ne correspond donc pas à un taux de croissance observé et ne peut pas être paramétré en fonction des données empiriques. Comme il a la même valeur pour toutes les entités du système et reste fixe durant la simulation, il correspond à une caractéristique du système plutôt qu'à une caractéristique de chaque entité.

de comparer les résultats d'une expérimentation à l'autre.

4.3.2.3 Le paramètre *InnovationLife*

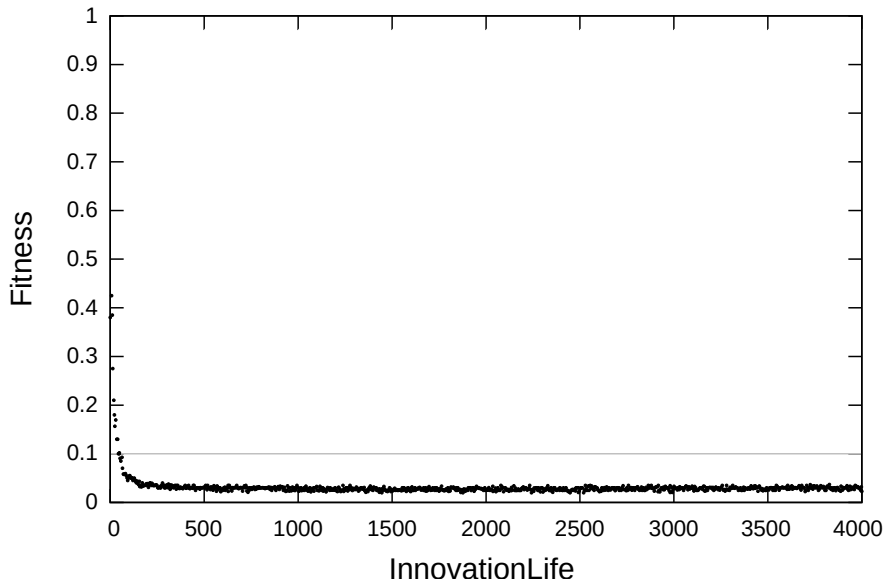


Figure 4.13 – Profil de calibrage du paramètre *InnovationLife* du modèle SimpopLocal

La valeur du paramètre *InnovationLife* désigne une durée (la *durée de vie* des innovations) durant laquelle une innovation peut se diffuser dans le système de peuplement. Le mécanisme associé (décrit à la section 3.2.3.6) peut être considéré comme totalement inhibé à la valeur singulière de 4000 du paramètre *InnovationLife* : comme la durée maximale d'une simulation du modèle SimpopLocal est de 4000 pas, un paramétrage de *InnovationLife* à 4000 signifie que les innovations peuvent être diffusées tout au long de la simulation et qu'il n'y a plus de contrôle de l'âge de chaque innovation pour la diffusion.

La figure 4.13 présente le profil de calibrage du paramètre *InnovationLife*. À la valeur singulière de 4000 pas de simulation, le calibrage du modèle est possible et évalué à moins de 0,04 de fitness (i.e. 4% d'erreur), la meilleure évaluation. Ce mécanisme n'est donc pas nécessaire pour simuler la dynamique recherchée. Plus généralement, à partir d'une valeur de paramétrage supérieure à 150, l'influence de la valeur du paramètre n'est pas significative, et l'ajustement du modèle pour le calibrage est possible. Une étude plus attentive des valeurs prises par les autres paramètres pour chaque paramétrage de ce profil montre que les valeurs des autres paramètres restent stables et similaires d'un paramétrage à l'autre, seul le paramètre *InnovationLife* évolue. Ceci indique qu'il n'y a pas d'effet de compensation entre les valeurs des paramètres mais plutôt que le mécanisme n'a pas d'influence sur les dynamiques recherchées pour des valeurs du paramètre *InnovationLife*

supérieures à 150. Cependant pour des valeurs de ce même paramètre inférieures à 150, le calibrage du modèle est de moins en moins bon, voire impossible pour des valeurs inférieures à 50. Il existe donc un effet de seuil : au dessus de 150 l'effet de durée de vie d'une innovation n'a plus aucune influence sur les dynamiques du modèle, mais en dessous de cette valeur la durée de vie des innovations joue sur le mécanisme de diffusion du modèle et donc sur les dynamiques simulées. Ce seuil semble être le seuil minimal, en dessous duquel le mécanisme de diffusion ne peut s'opérer dans les conditions optimales. Or ce mécanisme est indispensable pour le calibrage du modèle comme nous le verrons sur la figure 4.20. Ce seuil peut s'apparenter à un seuil de percolation pour la diffusion des innovations : en deçà, la saturation du système par les innovations est insuffisante pour provoquer une dynamique de croissance suffisamment forte.

Au dessous du seuil des 150 pas de simulation pour le paramétrage de *InnovationLife*, le calibrage du modèle est très difficile voire impossible. Au dessus de ce seuil, le mécanisme associé au paramètre *InnovationLife* n'a plus d'effet sur le calibrage du modèle. Dans un souci de parcimonie du nombre et de la complexité des mécanismes simulés dans le modèle SimpopLocal, il est justifiable de retirer du modèle ce mécanisme qui n'est pas nécessaire à la simulation de la dynamique de croissance recherchée. Nous avons donc choisi de simplifier le modèle en supprimant l'hypothèse d'une durée de vie limitée des innovations en fixant le paramètre *InnovationLife* à 4000 (comme ce qui avait été postulé pour le calibrage général du modèle décrit dans la section 4.1). Le modèle qui est donc exécuté pour la suite de cette expérimentation est un modèle à 5 paramètres libres au lieu de 6.

4.3.2.4 Le paramètre R_{max}

Le paramètre R_{max} entre en jeu dans le mécanisme d'impact de l'acquisition des innovations et permet de borner à une valeur maximale la taille possible des points de peuplement du modèle (mécanisme décrit à la section 3.2.3.2). Avec la définition des objectifs de calibrage, nous avons fixé que la taille optimale pour le plus grand point de peuplement devait approcher les 10000 habitants en fin de simulation (c.f. section 4.1.2.3). Le profil de calibrage du paramètre R_{max} (c.f. figure 4.14) présente un pic inversé pour des valeurs de R_{max} juste au dessus de 10000 : le calibrage du modèle est considéré comme bon pour des valeurs comprises entre 9500 et 11500, avec les meilleures optimisations possibles autour de 10100 habitants. Le profil de calibrage est cohérent avec l'objectif de population fixé et avec le fonctionnement du mécanisme associé au paramètre R_{max} . Par construction le modèle ne peut pas produire des comportements satisfaisants du point de vue du calibrage avec des valeurs de R_{max} inférieures à 10000, car dans ces cas la croissance serait bornée à une valeur inférieure à la valeur cible. Le mécanisme de croissance des points de peuplement ne permet d'atteindre que de façon asymptotique la borne maximale théo-

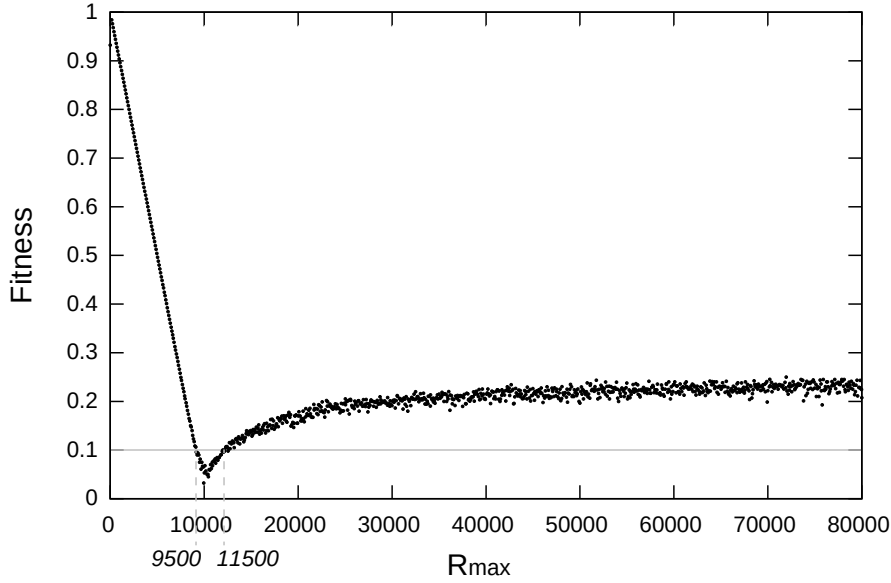


Figure 4.14 – Profil de calibrage du paramètre R_{max} du modèle SimpopLocal

rique fixée R_{max} , aussi il paraît nécessaire que la borne fixée soit légèrement supérieure à la valeur optimale recherchée pour permettre à la dynamique de croissance de l’atteindre. Si toutefois la valeur du paramètre R_{max} était trop éloignée de la valeur optimale de taille du plus grand point de peuplement en fin de simulation, alors il ne serait pas possible de reproduire les dynamiques de croissance recherchées : le calibrage du modèle deviendrait impossible pour un paramétrage de R_{max} au dessus des 11500 habitants. Pour ces valeurs, la courbe du profil est épaisse, ce qui indique une forte variabilité ou une instabilité des comportements du modèle.

Le profil de calibrage du paramètre R_{max} montre que globalement le mécanisme qui borne la croissance auquel est associé le paramètre R_{max} est nécessaire à la régulation de la dynamique du modèle pour le calibrage du modèle. Sans ce mécanisme, la croissance du système n’est pas suffisamment bien canalisée. R_{max} a donc comme bornes de paramétrage absolues : $[9500; 11500]$.

4.3.2.5 Le paramètre *InnovationImpact*

Le paramètre *InnovationImpact* permet de contrôler l’impact de l’acquisition d’une innovation par un point de peuplement sur sa croissance (mécanisme détaillé dans la section 3.2.3.2). Le profil global de calibrage de ce paramètre est présenté sur la figure 4.15. On observe sur ce graphique que le paramétrage optimal de *InnovationImpact* pour le calibrage est très difficile à borner. La zone contenant les quelques points de calibrage considérés comme satisfaisants est toute proche de la valeur de paramétrage 0. Elle est très étroite et très mal définie car elle contient à la fois des paramétrages très satisfai-

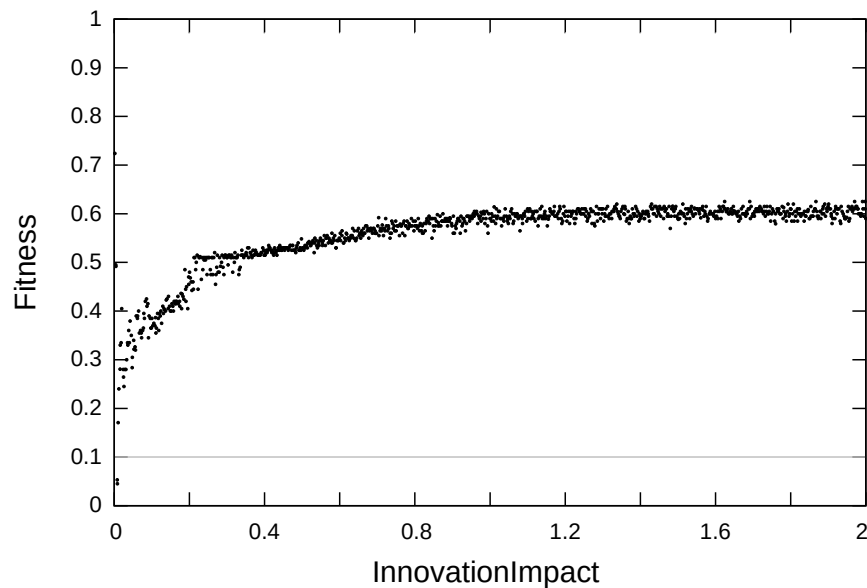


Figure 4.15 – Profil de calibrage du paramètre *InnovationImpact* du modèle SimpopLocal

sants (fitness inférieure à 0,1) et des paramétrages très peu satisfaisants (fitness allant jusqu'à 0,5). L'intervalle d'exploration pour le calcul de ce profil de calibrage correspond à l'intervalle de recherche initialement défini (c.f. tableau 4.4). Cependant cet intervalle de recherche ne permet pas de définir les bornes de paramétrage absolues. Pour mieux comprendre les comportements du modèle autour des valeurs optimales de calibrage, un nouveau calcul du profil de calibrage du paramètre *InnovationImpact* a été exécuté avec une définition plus fine de l'échelle d'exploration des valeurs de ce paramètre. Les nouvelles bornes d'exploration $[0; 0,02]$, ont été estimées à l'aide du premier profil (c.f. figure 4.15), et sont en cohérence avec les résultats de l'expérimentation pour le calibrage du modèle (c.f. tableau 4.4).

La figure 4.16 est le résultat d'une nouvelle exécution de l'algorithme de profil de calibrage mais avec un domaine d'exploration du paramètre *InnovationImpact* beaucoup plus restreint. La définition du profil est beaucoup plus détaillée pour ces valeurs plus ciblées du domaine de validité du paramètre. Ce deuxième profil de calibrage du paramètre *InnovationImpact* montre que des valeurs trop faibles du paramètre ne permettent pas de produire les dynamiques souhaitées. Dans ce cas, l'impact de l'acquisition d'une innovation est trop faible pour entraîner le système vers une dynamique de croissance suffisamment forte. Au contraire des valeurs trop fortes de l'impact de l'acquisition d'une innovation entraînent le système vers une croissance trop forte et déséquilibrée (c.f. note sur l'impact des innovation en section 3.2.3.7). Les bornes de paramétrage absolues du paramètre *InnovationImpact* sont donc : $[0,006; 0,01]$.

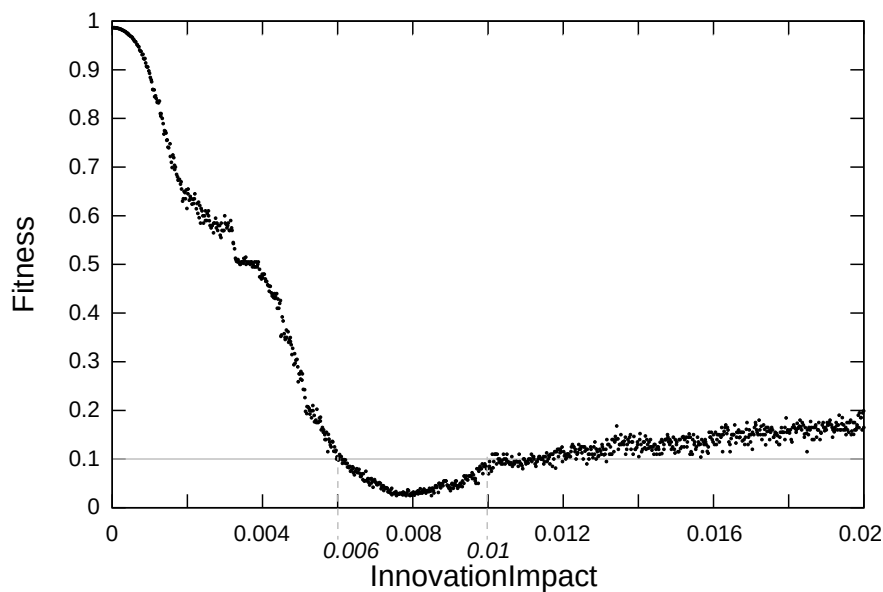


Figure 4.16 – Deuxième profil de calibrage du paramètre *InnovationImpact* du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)

4.3.2.6 Le paramètre $P_{creation}$

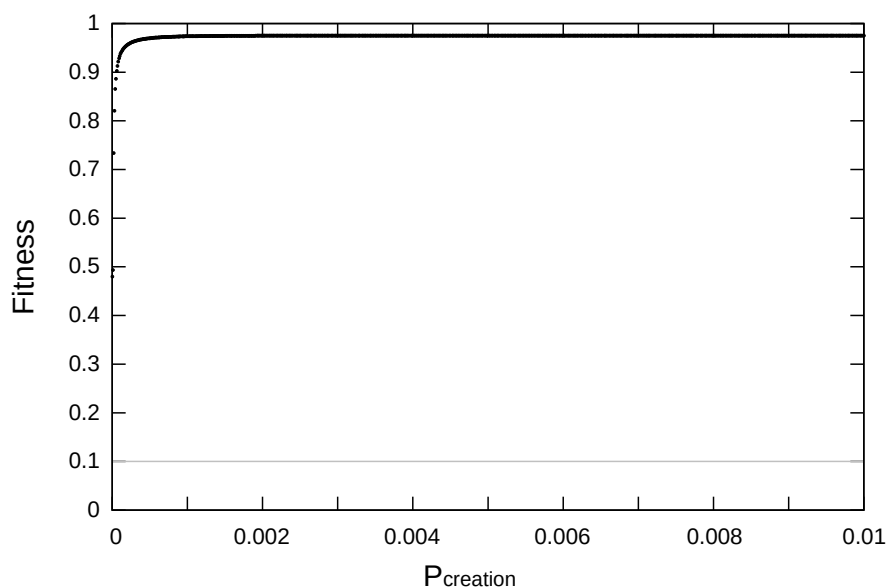


Figure 4.17 – Profil de calibrage du paramètre $P_{creation}$ du modèle SimpopLocal

Le paramètre $P_{creation}$ entre en jeu dans le mécanisme d'acquisition d'innovations par création au sein d'un même point de peuplement (mécanisme détaillé en section 3.2.3.4). Il détermine la probabilité qu'une interaction entre deux individus d'un même point de peuplement soit fructueuse, c'est-à-dire conduise à l'apparition d'une innovation. La probabilité qu'un point de peuplement innove par création est une combinatoire (grâce à

une loi Binomiale) de toutes les chances d'innover par l'interaction des individus, deux à deux, au sein du point de peuplement. Par définition la probabilité $P_{creation}$ est comprise entre 0 et 1, mais par déduction ce paramètre est très faible, très petit devant 1. Le profil de calibrage décrit par la figure 4.17 montre que la définition du domaine d'exploration des valeurs du paramètre est bien trop large pour établir le domaine de validité absolu. Il montre cependant que pour des valeurs trop fortes de probabilité, le calibrage du modèle est très mauvais par rapport aux objectifs fixés. L'inflexion du profil vers de meilleures fitness pour les valeurs très proches de 0 pousse à exécuter un nouveau calcul de profil avec un domaine d'exploration mieux ciblé sur les très faibles valeurs de probabilité.

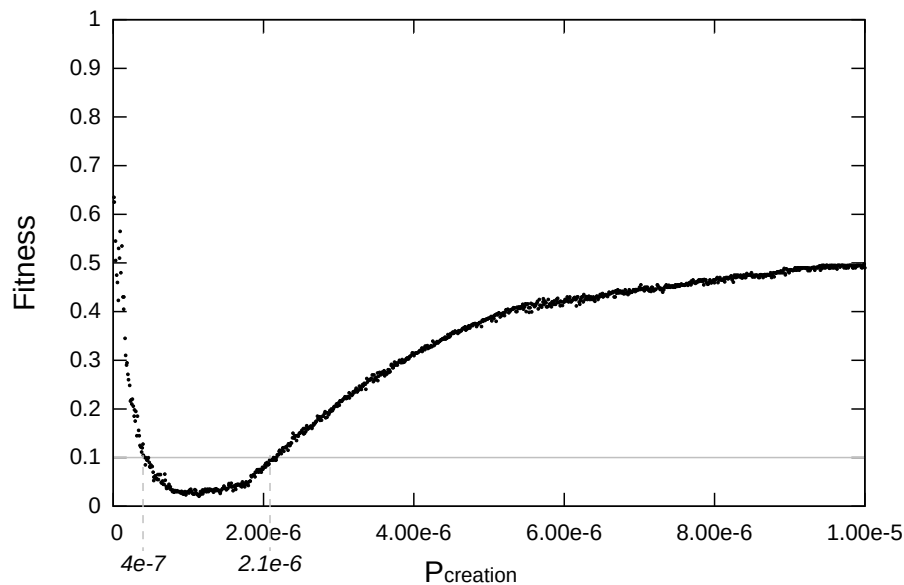


Figure 4.18 – Deuxième profil de calibrage du paramètre $P_{creation}$ du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)

Le nouveau profil de calibrage au domaine d'exploration plus restreint est donné par la figure 4.18. Il donne une meilleure visibilité du comportement du modèle autour du domaine de validité de calibrage du paramètre. Ce domaine est compris dans les bornes de paramétrage absolues $[4, 0.10^{-7}; 2, 1.10^{-6}]$. Pour des paramétrages de $P_{creation}$ dépassant cette borne supérieure, la création d'innovation est trop facile, si bien que la croissance s'emballe et sort des critères de dynamique recherchés. Pour des valeurs trop faibles et trop proches de 0 le modèle ne peut pas être calibré et n'est pas capable de produire les dynamiques recherchées : les innovations ne sont pas générées en nombre suffisant pour insuffler une dynamique de croissante assez forte.

4.3.2.7 Le paramètre $P_{diffusion}$

Le paramètre $P_{diffusion}$ entre en jeu dans le mécanisme d'acquisition d'innovations par diffusion entre deux points de peuplement (mécanisme détaillé en section 3.2.3.5). Il dé-

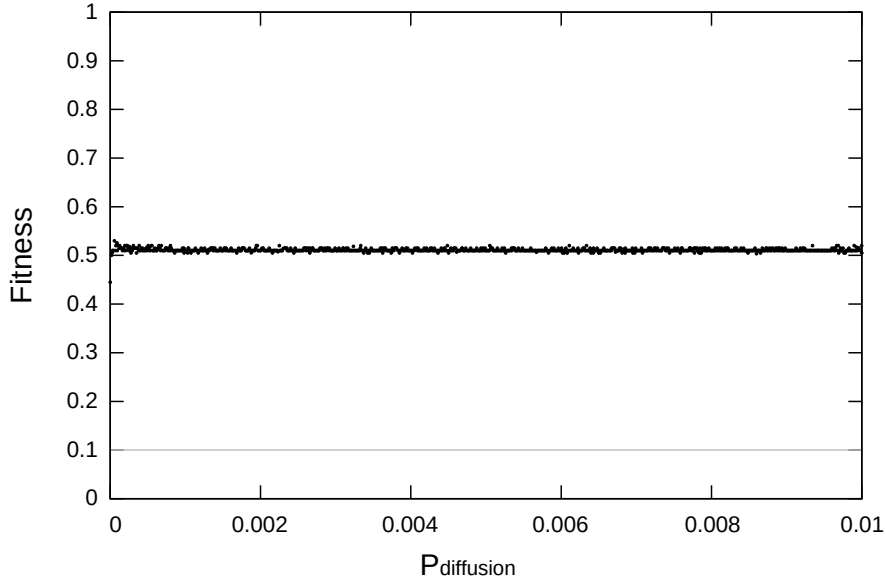


Figure 4.19 – Profil de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ du modèle SimpopLocal

termine la probabilité qu’une interaction entre deux individus de points de peuplement différents soit fructueuse, c’est-à-dire conduite à la diffusion d’une innovation depuis un point de peuplement la possédant à un point de peuplement ne la possédant pas encore. La probabilité qu’un point de peuplement innove par acquisition d’une innovation diffusée est une combinatoire (grâce à une loi Binomiale) de toutes les chances de diffusion par l’interaction des individus, deux à deux, des deux points de peuplement testés. Par définition la probabilité $P_{diffusion}$ est comprise entre 0 et 1, mais par déduction ce paramètre est très faible, très petit devant 1. Tout comme dans le cas de la figure 4.17, le profil de calibrage décrit par la figure 4.19 montre que la définition du domaine d’exploration des valeurs du paramètre est bien trop large pour définir le domaine de validité absolu. De la même façon, il est illustré que pour des valeurs trop fortes de probabilité, le calibrage du modèle est très mauvais par rapport aux objectifs fixés. Globalement ce profil (stationnaire à la valeur de fitness 0,5) semble montrer que sur l’ensemble des valeurs de $P_{diffusion}$ testées à cette échelle de définition, le modèle ne peut pas être calibré. Cependant la première expérience de calibrage et le fait que ce profil présente un point très proche de 0 avec une meilleure fitness, indique qu’il existe des valeurs de ce paramètre pour lesquelles le calibrage est possible. Ce constat pousse à exécuter un nouveau calcul de profil avec un espace d’exploration mieux ciblé sur les très faibles valeurs de $P_{diffusion}$.

Comme pour le paramètre $P_{creation}$, ce nouveau profil (c.f. figure 4.20) de calibrage donne une meilleure visibilité du comportement du modèle autour du domaine de validité de calibrage du paramètre. Ce domaine est compris dans les bornes de paramétrage absolues $[3, 0.10^{-7}; 1, 8.10^{-6}]$. À partir d’un paramétrage de $P_{diffusion}$ dépassant cette borne supérieure, la diffusion d’innovation est trop facile, si bien que la croissance s’emballe et

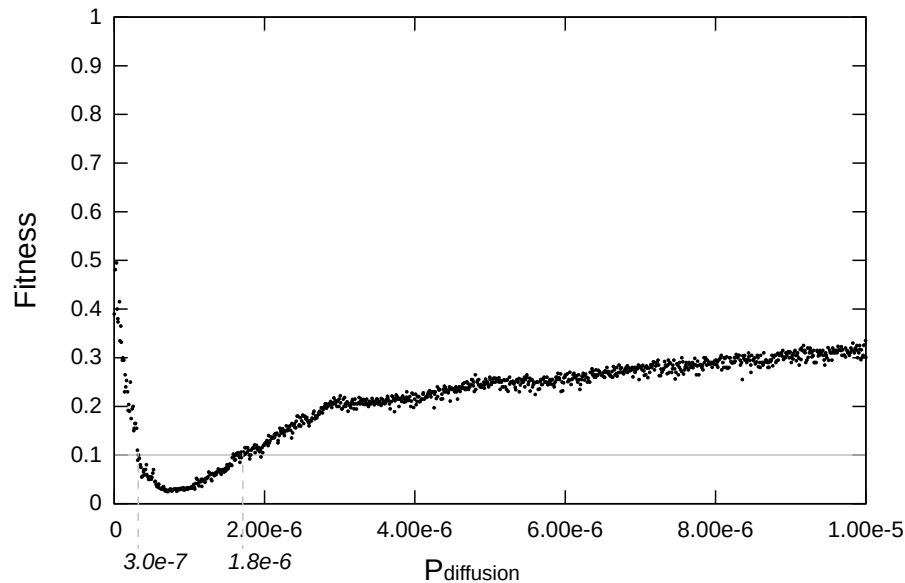


Figure 4.20 – Deuxième profil de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)

sort des critères recherchés. Pour des valeurs trop faibles et trop proches de 0 le modèle n'est pas capable de produire des dynamiques satisfaisantes.

Le comportement du modèle à la valeur de paramétrage singulière de 0 est très intéressant. Pour cette valeur, le mécanisme de diffusion est inhibé (probabilité de diffusion = 0). Pour cette valeur, la fitness du modèle est proche de 0,4 (40% d'erreur) : quelles que soient les valeurs des autres paramètres il n'est pas possible de simuler des dynamiques qui soient conformes aux dynamiques recherchées. Ce résultat permet de montrer que le mécanisme de diffusion est nécessaire à la génération d'une dynamique de hiérarchisation du système de peuplement qui soit conforme à ce qui est attendu. Le mécanisme de diffusion permet de réguler la cinétique du modèle. Dans le cadre des hypothèses de modélisation posées et de la théorie qui encadre le développement du modèle SimpoLocal, l'interaction entre les points de peuplement est donc nécessaire à une simulation de processus de croissance qui soient représentatifs d'évolutions réelles de systèmes de peuplement.

La comparaison des profils de calibrage des deux paramètres $P_{creation}$ et $P_{diffusion}$ indique que le calibrage du modèle est bien plus mauvais pour un mauvais paramétrage de $P_{creation}$ (fitness proche de 1) que pour un mauvais paramétrage de $P_{diffusion}$ (fitness de 0,5). Sans un mécanisme de création d'innovations opérationnel, la dynamique simulée est très différente (100% d'erreur) de ce qui est attendu, alors que pour un mécanisme de diffusion mal calibré, la dynamique du modèle est plutôt mal régulée. Cependant les deux mécanismes sont tout autant nécessaires pour la génération d'un comportement de modèle représentatif d'évolutions observées sur des systèmes réels : sans l'effet de l'un des deux, les dynamiques simulées ne peuvent pas être satisfaisantes.

De plus, le domaine de validité de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ ($[3, 0.10^{-7}; 1, 8.10^{-6}]$) est légèrement inférieur à celui du paramètre $P_{creation}$ ($[4, 0.10^{-7}; 2, 1.10^{-6}]$). Ce décalage a déjà été discuté dans la section 4.1.3.2. Ces domaines de validité de paramétrage ne se comprennent pas dans l'absolu mais bien relativement en fonction des valeurs prises par les autres paramètres du modèle. Ces deux paramètres $P_{creation}$ et $P_{diffusion}$ sont intimement liés entre eux et autres paramètres relatifs aux innovations tels que *InnovationLife*, *InnovationImpact* et *DistanceDecay*. Il serait très instructif d'éteindre cette méthode de profil de calibrage pour produire des paysages de calibrage avec des graphiques tri-dimensionnels qui compareraient la fitness du calibrage en fonction de valeurs prises par les deux paramètres à la fois, comme peut le faire la méthode MOLE (MOURET et CLUNE, 2008).

4.3.2.8 Le paramètre *DistanceDecay*

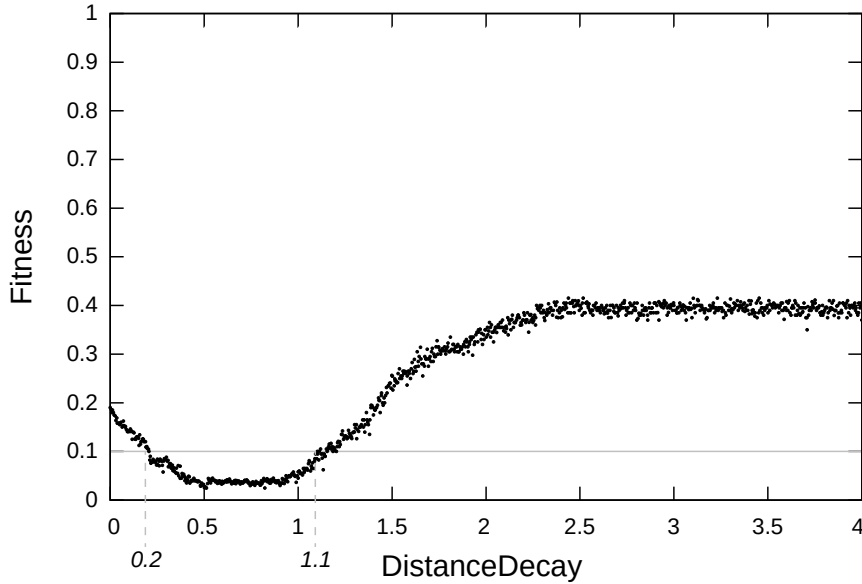


Figure 4.21 – Profil de calibrage du paramètre *DistanceDecay* du modèle SimpopLocal

Le paramètre *DistanceDecay* est impliqué dans le mécanisme de diffusion des innovations et permet d'introduire un effet de la distance sur la probabilité de diffusion d'innovations entre deux points de peuplement (le mécanisme est détaillé en section 3.2.3.5). Toutes choses égales par ailleurs, plus les points de peuplement sont éloignés et plus la diffusion d'innovations entre ces deux points est faible. Le paramètre régule la force du frein avec la distance. Son profil de calibrage (c.f. figure 4.21) indique que si ce frein est très fort (supérieur à 1,25), ce qui inhibe progressivement le mécanisme de diffusion, le calibrage du modèle devient impossible. On retrouve les mêmes valeurs de fitness de calibrage que pour des valeurs trop faibles de probabilité du paramètre $P_{diffusion}$ (qui inhibe de même le mécanisme de diffusion). Ce résultat montre la bonne cohérence des résultats

de calibrage d'un profil à l'autre. Par ailleurs pour des valeurs trop faibles de frein avec la distance, le calibrage du modèle n'est pas satisfaisant, y compris à la valeur singulière de 0 pour laquelle l'effet de la distance n'est pas pris en compte. Ce résultat prouve que le frein aux interactions opéré par la distance permet aussi de mieux réguler la cinétique de la croissance du système de peuplement. En répartissant la croissance spatialement, il permet de créer une hétérogénéité entre les dynamiques de croissance des points de peuplement propice à la formation d'une distribution log-normale des tailles. Le domaine de validité du paramétrage se situe dans les bornes de paramétrage absolues $[0, 2; 1, 1]$.

4.3.3 L'apport de la méthode d'exploration des comportements de modèles par les profils de calibrage

Tout d'abord, l'analyse de ces profils de calibrage des paramètres libres du modèle SimpopLocal a permis de valider, au moins en partie, la méthode et son utilisation de trois manières différentes :

- Les bornes de calibrage absolues, qui définissent le domaine de variabilité de chaque paramètre en dehors duquel il est impossible de calibrer le modèle, encadrent toutes le domaine de variabilité des paramétrages calibrés identifiés avec la première expérience de calibrage (c.f. le tableau 4.6). Les résultats sont donc cohérents d'une expérimentation à l'autre.
- Les différents profils, qui sont des exécutions indépendantes de l'algorithme des profils de calibrage, présentent de fortes cohérences de l'un à l'autre. La comparaison des profils des paramètres $P_{diffusion}$ et $DistanceDeacy$ montrent que le même effet (inhibition du mécanisme de diffusion) induit par deux causes différentes (jeu sur un paramètre ou l'autre) produit le même résultat sur la qualité du calibrage du modèle.
- La nécessité de générer plusieurs profils à différentes échelles d'exploration pour un même paramètre prouve la difficulté de fixer l'échelle pour l'observation des comportements intéressants du modèle. L'exemple des profils de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ est emblématique. Alors que la première échelle d'exploration du paramètre était déjà fine (c.f. figure 4.19), elle ne permettait pas du tout de déterminer l'ordre de grandeur du paramètre pour le calibrage (et aurait même pu faire douter de la possibilité du calibrage si les autres profils du modèle n'étaient pas considérés). La deuxième exploration, beaucoup plus restreinte dans l'espace de variation possible du paramètre (c.f. figure 4.20) permet de définir le domaine de validité du calibrage pour ce paramètre. Cette difficulté à juger et trouver les bons ordres de grandeur de

Paramètre	Domaine possible de recherche	Domaine de variation dans le front de Pareto	Domaine de validité de calibrage
R_{max}	[1; 40000]	[10090; 10465]	[9500; 11500]
$InnovationImpact$	[0; 2]	[7, 7.10^{-3} ; 8, 4.10^{-3}]	[6.10^{-3} ; 10^{-2}]
$P_{creation}$	[0; 1]	[1, 1.10^{-6} ; 1, 3.10^{-6}]	[4, 0.10^{-7} ; 2, 1.10^{-6}]
$P_{diffusion}$	[0; 1]	[6, 7.10^{-7} ; 6, 9.10^{-7}]	[3.10^{-7} ; 1, 8.10^{-6}]
$DistanceDecay$	[0; 4]	[0, 66; 0, 75]	[0, 2; 1, 1]

Tableau 4.6 – Comparaison du domaine d’exploration possible, du domaine de variation dans le front de Pareto (expérimentation de calibrage) et du domaine de validité du calibrage (expérimentation des profils de calibrage) des 5 paramètres libres du modèle SimpopLocal

l’exploration de l’espace de paramétrage montre l’inadaptabilité pour ce type de modèle des plans d’exploration tels que les plans complets ou les plans aléatoires. Ceci justifie le développement d’outils d’exploration adaptés aux modèles multi-agents comme l’algorithme EP de calcul de profil de calibrage.

Le développement de la méthode de calcul des profils de calibrage et leur analyse pour chaque paramètre libre du modèle SimpopLocal a permis des avancées décisives dans la compréhension des comportements du modèle et dans son évaluation.

Cette méthode nous a permis de définir les domaines de validité du calibrage pour chaque paramètre du modèle, c’est-à-dire les bornes de variation du paramètre en dehors duquel il n’est pas possible de produire des simulations qui génèreraient des dynamiques satisfaisantes. Ces domaines sont continus et plus généralement tous les profils sont lisses et réguliers : les comportements du modèle ne semblent pas irréguliers ou erratiques, l’espace de réponse du modèle ne semble pas trop compliqué. Ce constat permet d’être confiant pour affirmer que les minimums globaux pour le calibrage global du modèle et pour les profils ont été trouvés.

Cette méthode nous a aussi permis d’être plus parcimonieux dans le développement du modèle. Elle a permis d’identifier un mécanisme dont l’introduction dans le modèle n’apportait aucune subtilité aux comportements simulés. Le mécanisme étant sans effet sur les résultats attendus, et comme il n’avait globalement qu’un effet très limité sur la dynamique simulée, nous avons décidé de le retirer des hypothèses de modélisation et de désactiver son action dans le modèle.

Cette méthode a par ailleurs permis de valider la nécessité de tous les autres mécanismes introduits dans le modèle pour un calibrage satisfaisant. Des valeurs singulières pour chaque paramètre étudié permettent de tester le comportement du calibrage du mo-

dèle lorsque les mécanismes correspondants sont totalement inhibés. À chaque fois qu'un mécanisme est inhibé, le meilleur calibrage possible n'est pas satisfaisant. Tous ces mécanismes sont donc nécessaires au bon déroulement de la simulation, selon les trois objectifs de calibrage.

Ces résultats apportés par l'analyse des profils de calibrage permettent un retour précieux sur les hypothèses de modélisation et sur la théorie urbaine qui encadre le développement du modèle. La théorie évolutive urbaine (c.f. section 1.5.2) qui a guidé la construction des modèles *SimpopLocal* et *SimpopNet* (c.f. section 2.2.4.1), et plus généralement tous les modèles de la famille *Simpop*, insiste sur la notion de système, c'est-à-dire de relation et d'interaction entre les entités constitutives du système. L'ensemble des modèles de la famille *Simpop* incorporent donc tous des mécanismes nécessaires d'interaction entre entités élémentaires (villes, villages ou points de peuplement). Pourtant, c'est la première fois que des résultats d'exploration de modèle prouvent que ces mécanismes d'interaction au niveau des entités du système sont indispensables à la production d'une évolution de système proche des évolutions de systèmes réels¹⁸. Sans ces mécanismes d'interaction (contrôlés dans *SimpopLocal* par les paramètres $P_{diffusion}$ et $DistanceDecay$), il n'est pas possible de générer des dynamiques de croissance qui soient représentatives de dynamiques effectivement observées dans des systèmes réels. Ces résultats montrent aussi l'importance du rôle de l'espace dans la structuration et l'organisation du système de peuplement : sans l'effet du paramètre $DistanceDecay$, qui freine les interactions avec la distance, les évolutions du système simulé ne sont plus représentatives des évolutions de système réels. Ces résultats permettent donc de revenir sur la théorie à l'origine du travail de modélisation, d'en valider une partie par la simulation, et ainsi de justifier l'effort de modélisation et celui d'exploration de modèles.

18. Il faut cependant garder à l'esprit que la représentativité des évolutions de systèmes réels dépend des objectifs de calibrage qui ont été fixés. La fonction d'évaluation (fitness) quantifie l'écart entre les évolutions des systèmes simulés et les évolutions des systèmes réels. Les résultats de ces expérimentations reposent donc sur la fiabilité du système d'évaluation défini pour l'expérimentation.

Conclusion : une méthode d'exploration de modèle multi-agents efficace et réutilisable

Les deux nouvelles méthodes d'exploration de modèles présentées dans ce chapitre ont été développées et appliquées au modèle SimpopLocal avec succès. Elles ont permis des avancées décisives dans l'évaluation de SimpopLocal et plus généralement dans l'évaluation des modèles multi-agents.

La première expérimentation a conduit à la proposition d'une série de paramétrages pour le calibrage du modèle. Ce résultat a prouvé que le modèle SimpopLocal, dans sa parcimonie de mécanismes, est capable de générer de façon très satisfaisante des évolutions plausibles de systèmes de peuplement, y compris l'émergence d'un système urbain hiérarchisé. La nouveauté du protocole d'exploration se situe dans la combinaison de trois principes : un cadre conceptuel qui explicite et quantifie les critères d'évaluation des sorties du modèle étudié, une méthodologie intelligente d'exploration de l'espace de paramétrage fondée sur une procédure automatisée qui utilise des algorithmes évolutionnaires, et un protocole technique pour réduire les temps de calcul grâce à une parallélisation massive. Les résultats de cette expérimentation illustrent le potentiel de cette nouvelle approche pour l'exploration des dynamiques de modèles multi-agents. Elle est d'ores et déjà utilisée sur d'autres modèles : MARIUS et MicMac.

Un deuxième protocole d'expérimentation a ensuite été développé pour combler certaines lacunes de la première expérimentation pour le calibrage du modèle. Ce deuxième protocole génère des profils de calibrage pour tous les paramètres libres du modèle. Ces profils permettent d'explicitier individuellement les effets de chaque paramètre sur le calibrage du modèle. Les résultats obtenus sont extrêmement précieux. Ils permettent de valider la nécessité ou non des mécanismes mis en place pour la génération des comportements attendus et d'identifier les conditions nécessaires au calibrage du modèle. En rapportant ainsi l'effet de chaque mécanisme simulé sur les comportements attendus du modèle, ce protocole d'exploration permet d'ouvrir un débat sur les mécanismes implémentés, leur choix, leur forme d'implémentation, leur nécessité, leur représentativité et leur efficacité. Ce débat stimule ainsi des allers et retours féconds entre la théorie et le modèle. Appliquée à SimpopLocal, cette expérimentation a permis d'éliminer un mécanisme dont les effets n'étaient pas satisfaisants et de valider la nécessité de tous les autres. Or la définition de ces mécanismes était encadrée par la théorie évolutive urbaine. Ces résultats ont donné un retour encore inédit sur la théorie évolutive urbaine en prouvant la nécessité des interactions inter-unités de peuplement pour simuler de façon plausible les évolutions de système de peuplement.

À partir d'un questionnement initial sur le calibrage du modèle SimpopLocal, des outils et des protocoles d'exploration innovants et efficaces ont ainsi été produits. Ils sont

libres et accessibles, via les plateformes SimProcess (REY COYREHOURCQ, 2014) et Open-MOLE¹⁹. Ils ont été développés dans un souci de généricité pour garantir leur utilisation dans de nombreux autres contextes de modélisation. Leur utilisation améliore la qualité de la communication autour du modèle en assurant la répétabilité des expérimentations d'une part et en apportant des éléments concrets d'évaluation des dynamiques simulées d'autre part.

19. <http://www.openmole.org/>

SimpopNet : Un modèle pour des villes en réseau

"Si les villes sont des accumulateurs de richesse (Braudel 1985), la qualité et la durabilité des gains acquis dépendent en partie de leur accessibilité, sans cesse remise en question."

BRETAGNOLLE, 2009, p.105

5.1	La coévolution entre les réseaux d'échange et les systèmes de villes : des faits stylisés pour le modèle SimpopNet	244
5.1.1	Le débat sur les liens de causalité entre l'évolution de l'accessibilité et la croissance urbaine	244
5.1.2	Un débat aux implications complexes et multi-échelle difficiles à trancher	247
5.1.3	Les faits stylisés au niveau macro-géographique de la coévolution entre le réseau de transport et la croissance urbaine . . .	248
5.1.4	Les faits stylisés au niveau micro-géographique de la coévolution entre les réseaux de transport et la croissance urbaine . .	254
5.1.4.1	L'effet positif de la dynamique d'une ville sur son accessibilité	254
5.1.4.2	Les évaluations des impacts économiques des investissements dans les infrastructures de transport . . .	256
5.1.4.3	Les travaux géographiques sur la corrélation entre la dynamique urbaine et l'évolution de l'accessibilité .	259

5.1.4.4	Résumé de l'état des connaissances sur la boucle de coévolution entre accessibilité et dynamique urbaine à l'échelle micro-géographique	262
5.1.5	Synthèse des faits-stylisés de la coévolution entre réseau de transport et dynamique urbaine : des enjeux pour le modèle SimpopNet	264
5.2	Une modélographie sur la coévolution entre les réseaux d'échange interurbains et les systèmes de villes	267
5.2.1	Les modélisations de l'effet de l'organisation du réseau de transport sur la croissance urbaine	267
5.2.1.1	Les modèles d'impact du changement d'accessibilité sur l'économie urbaine	267
5.2.1.2	Les modèles de potentiels d'interactions avec prise en compte du réseau d'échange	268
5.2.1.3	Les modèles gravitaires de croissance urbaine avec potentiels d'interactions	270
5.2.2	Les modélisations de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de villes sur la croissance des réseaux de transport . . .	271
5.2.2.1	L'évolution des approches de modélisation de la croissance de réseaux de transport	272
5.2.2.2	Les deux modèles de croissance de réseaux de GASTNER et NEWMAN (2006)	273
5.2.2.3	Les modèles de croissance de réseaux par attachement préférentiel avec dimension spatiale	276
5.2.3	Des modèles de coévolution entre les réseaux de transport et les systèmes urbains	277
5.2.3.1	Les modèles LUTI	277
5.2.3.2	Un modèle individus-centré de la coévolution système de villes et réseau de communication	279
5.3	Le modèle SimpopNet	281
5.3.1	Les enjeux de simulation (<i>Purpose</i>)	281
5.3.2	Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (<i>Entities, state variable, and scale</i>)	282
5.3.3	Les dynamiques de SimpopNet (<i>Processes overview and scheduling</i>)	285
5.3.3.1	Croissance du réseau de transport par coévolution : le mécanisme <i>coevolution-network</i>	285

5.3.3.2	Croissance scénarisée du réseau de transport : le mécanisme <i>scenario-network</i>	287
5.3.3.3	Croissance des villes par coévolution (hypothèse h1) : le mécanisme <i>coevolution-cities</i>	288
5.3.3.4	Croissance aléatoire des villes (hypothèse h3) : le mécanisme <i>gibrat-cities</i>	290
5.3.4	Déroulement d'une simulation (<i>Design Concept</i>)	291
5.3.4.1	Le formalisme d'implémentation du modèle SimpopNet	291
5.3.4.2	L'initialisation	291
5.3.4.3	La condition d'arrêt	294
5.3.4.4	Déroulement d'un pas de simulation	294
5.3.5	Les premiers résultats de l'exploration du modèle SimpopNet	297
5.3.5.1	Paramétrages du modèle SimpopNet pour deux expérimentations	297
5.3.5.2	Première expérimentation : la hiérarchisation du système de peuplement par l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine	300
5.3.5.3	Deuxième expérimentation : simulation d'un système urbain en coévolution avec le réseau de transport .	303

Introduction : explorer par la simulation la coévolution entre le réseau d'échange interurbain et le système de villes

Deux régimes successifs de dynamiques de système de villes ont été mis en évidence dans le premier chapitre (c.f. section 1.4.2). Ces deux régimes ont été distingués selon l'hypothèse simplificatrice que les conditions d'accès aux ressources limitent la croissance des centres de peuplement. Le premier régime est caractérisé par une croissance fortement contrainte par les conditions locales : les coûts et la pénibilité des échanges à longue distance limitent le niveau de croissance à ce qui peut localement être accessible donc exploitable. Ce premier régime est simulé grâce au modèle SimpopLocal (c.f. chapitre 3 et 4). Le deuxième régime, survenu après la révolution industrielle dans les pays anciennement industrialisés, semble "libéré" de toutes les contraintes locales grâce à *l'invention de la vitesse* (STUDENY, 1995) qui révolutionne les transports. Cette révolution réduit le temps, les coûts mais aussi les risques de transports et multiplie les capacités de charge de chaque échange (BAIROCH, 1985). Dès lors, la limitation des échanges à longue distance qui caractérisait le premier régime de dynamique des villes est considérablement relâchée. Cette nouvelle donne induit une importante mise en réseau des ressources à une nouvelle échelle : les économies urbaines peuvent maintenant interagir et échanger presque sans contrainte. La mise en réseau, en levant les limites à la croissance, provoque donc une formidable expansion du nombre des villes, de leur dimension et de leur emprise territoriale.

Cette formidable expansion stimulée par la révolution des transports est aussi accompagnée d'un accroissement considérable des inégalités de tailles des villes. En effet les disparités dans l'intensité des croissances urbaines deviennent de plus en plus discriminantes en fonction de la taille des villes. Ainsi, on observe une accélération de la hiérarchisation des systèmes de villes avec la mise en réseau des économies. Nous avons formulé une hypothèse dans le premier chapitre (c.f. section 1.4.2) pour expliquer ce processus. Ce qui différencie les croissances des centres de peuplement dans ce deuxième régime est la situation des villes les unes par rapport aux autres au sein d'un système de villes en interactions. Dans ce système, les villes les plus accessibles sont celles dont les échanges sont les plus facilités. Or les échanges et les interactions sont à l'origine des dynamiques d'innovations et elles-mêmes moteur de la croissance urbaine (c.f. section 1.3).

La situation relative des villes dans le système de villes, résumée par son accessibilité¹ ou sa centralité² en fonction des réseaux de communication irriguant le système de villes, joue comme une contrainte sur la croissance urbaine.

La première section de ce chapitre montre l'ambivalence de cette hypothèse. Très répandue et reprise dans les discours politiques, elle justifie les lourds investissements dans les projets de transports, et elle est le support de nombreux modèles économiques. Pourtant le lien de causalité, qui lie la dynamique (économique et démographique) d'une ville à sa place relative dans le réseau formé par les échanges interurbains fait encore débat. Après avoir exposé la complexité de cette problématique et rassemblé les connaissances acquises sur la question (section 5.1), nous choisissons de suivre la piste d'une coévolution entre le système de transport et le système de villes. Le terme coévolution résume l'hypothèse de l'existence d'actions réciproques d'un système sur l'autre, c'est-à-dire l'existence d'une boucle de rétroactions positives entre la structure d'un réseau de transport et la structure d'un système de villes. Nous montrons dans la suite de ce chapitre comment cette hypothèse peut être modélisée et comment la modélisation peut contribuer à éclaircir le débat sur les liens de causalité entre accessibilité/centralité et dynamique urbaine. Des modèles, plus ou moins centrés sur l'étude de cette question, ont déjà été proposés dans la littérature (section 5.2), mais certains aspects n'ont pas encore été défrichés. C'est pourquoi nous proposons le modèle SimpopNet, dont la conception est nourrie de cette modélisation. Le modèle SimpopNet a ainsi été construit afin de tester différentes hypothèses relatives à la coévolution entre le réseau d'échange et le système de villes (section 5.3). Les premiers résultats obtenus sont présentés en dernière section de ce chapitre (section 5.3.5). Tout comme le modèle SimpopLocal, la description du modèle SimpopNet se veut la plus détaillée possible, et suit donc le même cadre descriptif explicité en section 2.2.

1. CHAPELON (2004) donne dans *Hypergéométrie* une définition de l'accessibilité : "*En Géographie, l'accessibilité d'un lieu est généralement définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle ce lieu peut être atteint à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, par un ou plusieurs individus susceptibles de se déplacer à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants. Ainsi, l'accessibilité ne renvoie pas uniquement à la seule possibilité d'atteindre ou non un lieu donné, mais elle traduit également la pénibilité du déplacement, la difficulté de la mise en relation appréhendée le plus souvent par la mesure des contraintes spatio-temporelles.*"

2. PUMAIN (2004a) donne dans *Hypergéométrie* une définition de la centralité : "*La [...] centralité caractérise la position plus ou moins accessible d'un nœud dans un réseau, elle se mesure par des indices de position d'un sommet dans un graphe. On distingue d'ailleurs deux types de position centrale dans un réseau : celle qui minimise la somme des distances [...] d'un nœud à l'ensemble de tous les autres [...] et celle qui minimise la distance maximale [...] entre un nœud et tout autre nœud du réseau [...].*"

5.1 La coévolution entre les réseaux d'échange et les systèmes de villes : des faits stylisés pour le modèle SimpopNet

Le lien de causalité entre l'évolution de l'accessibilité d'une ville et l'évolution de son attractivité urbaine (et par conséquent de sa croissance économique et démographique) est une question épineuse qui fait débat depuis quelques décennies déjà. Si ce lien de causalité semble banal tant il est repris et cautionné, jusqu'à servir d'argument majeur pour le développement de grands projets d'aménagement de transport, il est pourtant loin d'être démontré (OFFNER, 1993 ; BANISTER et BERECHMAN, 2001). Cette problématique fait l'objet d'études dans des disciplines telles que l'aménagement, l'économie et la géographie. Ces études cherchent à caractériser les relations qu'entretiennent des indicateurs tels que la taille d'une ville, son rang dans la hiérarchie des villes, sa croissance économique/démographique et son accessibilité. La diversité de ces différentes approches scientifiques constatées reflète en réalité la complexité du problème qui se pose à différentes échelles du territoire.

5.1.1 Le débat sur les liens de causalité entre l'évolution de l'accessibilité et la croissance urbaine

Bien que le débat sur les liens de causalités entre gain d'accessibilité et croissance urbaine reste toujours d'actualité, les positions exprimées ont évolué et se sont multipliées avec les apports successifs de travaux empiriques. La corrélation entre les évolutions de la croissance d'une ville et son accessibilité a souvent été montrée et vérifiée : les villes les plus grandes et présentant les croissances les plus fortes sont, dans la plupart des cas, aussi les villes les plus accessibles, et réciproquement (PUMAIN, 1982 ; BRETAGNOLLE, 1999 ; BRETAGNOLLE, 2003 ; BRETAGNOLLE, 2009)³. De plus, la structure de la hiérarchie urbaine concorde globalement avec la structure de la hiérarchie des réseaux de transport : il existe donc une corrélation structurelle entre les deux systèmes (BRETAGNOLLE, 1999, p.169). Ces constats sont partagés par la communauté scientifique et le débat se positionne plutôt sur la question de la relation entre modification de l'accessibilité et modification de la croissance urbaine : existe-il des liens de causalité entre évolution de l'accessibilité et intensité de la croissance urbaine ?

Autour de cette question, se sont d'abord exprimés les partisans du rôle moteur et discriminant des réseaux de transport sur la croissance urbaine. La connexion d'un centre

3. BRETAGNOLLE (2003, p.313) montre que des recherches ont été menées sur "*le lien éventuel entre le niveau de desserte et la croissance démographique des villes (Lepetit 1988, Pumain 1982), [et] sur la présence d'effets structurants des nouveaux transports (Laroque et Jigaudon 1985, Offner 1993).*"

urbain à un réseau innovant, c'est-à-dire *a priori* plus performant que ce dont il pouvait disposer jusque là, a un impact positif sur sa croissance économique et démographique. Le réseau innovant devient le moteur d'une évolution et d'une réorganisation stimulante du système urbain. À travers cet effet moteur et parce qu'il est inégalement réparti sur le territoire (il ne connecte pas tous les centres urbains), le réseau innovant joue également un fort rôle discriminant sur les rythmes de croissance urbaine. On parle alors d'*effet structurant* des réseaux de transport. C'est la position exprimée par P. George cité par (PUMAIN, 1982, p.46) : *"Le chemin de fer joue, jusqu'à la fin de la première guerre mondiale, le rôle de stimulant unique du développement et de la croissance économique. Le tracé du réseau détermine les rythmes de croissance, provoque des sélections irrémédiables entre les villes pourvues de grandes gares, de bifurcations, de triages, et celles qui ne sont atteintes que par un maigre affluent ferroviaire. Certaines souffriront pendant des décennies de n'être touchées que par des embranchements en cul-de-sac, comme Orléans et Tours. Le chemin de fer a joué au XIX^e siècle le rôle de facteur de discrimination urbaine."* Ce positionnement est le reflet de la pensée saint-simonienne qui a influencé les ingénieurs issus des Ponts et Chaussées à l'origine des plus grands projets d'infrastructures de transport du XIX^e siècle : *"les héritiers de Saint-Simon, sont au cœur de la création des réseaux, ayant la profonde conviction de leurs effets sur les territoires"* (MIMEUR, 2013).

Avec la publication de nouveaux travaux quantitatifs, une autre position se fait entendre : la répartition spatiale des centres urbains et les dynamiques de croissances urbaines déjà existantes conditionnent l'organisation spatiale du développement d'un nouveau réseau de transport. Le gain en accessibilité d'une ville ou d'un lieu, grâce à une meilleure connexion au réseau de transport s'appuie sur une économie locale en "bonne santé". La trame spatiale des nouveaux réseaux de transport s'adapte aux dynamiques de croissance existantes. La structure du réseau n'est donc qu'une affirmation de tendances antérieures, c'est-à-dire qu'elle conduit à renforcer *les positions économiques acquises plutôt que de créer une situation nouvelle* tel que l'affirme Wolkowitsch cité par (PUMAIN, 1982, p.47) : *"On peut donc suggérer que le chemin de fer est en général plus un "révélateur" qu'un "facteur" de discrimination urbaine. Il semble qu'il ait conservé ou renforcé des disparités anciennes de taille et de vitalité démographique plus qu'il ne les ait créées"*. Cette position est très répandue depuis les années 90 comme le fait remarquer BRETAGNOLLE (2005, p.127) : *"la mise en place de réseaux performants ne bouleverse pas les dynamiques économiques et démographiques mais les renforce (Lévy 1997 p.109, Garrison 1990 p.9-10, Bavoux et alii p.45 et 206)"*, mais aussi BAZIN et al. (2011, p.215) : *"Les travaux académiques ont de longue date montré qu'il n'existait aucune causalité linéaire entre infrastructures de transport et transformations sociales, spatiales et économiques. De nombreuses recherches académiques montrent qu'aucun effet systématique en termes de dynamique économique ne résulte de la seule présence d'une infrastructure de transport"*. J.-M. Offner parle même d'un *"mythe politique"* et d'une *"mystification scientifique"*. De-

puis la révolution industrielle du XIX^e siècle, l'argument de l'effet structurant des réseaux de transport sert de justification aux grands projets d'aménagement. Or l'effet positif sur les économies urbaines de la mise en service d'un nouvel équipement de transport n'est pas démontré *"les travaux empiriques rigoureux ne concluent, au mieux, qu'à une amplification et une accélération des tendances existantes"* (OFFNER, 1993, p.233). J.-M. Offner conclut que *"si le mythe des effets structurant perdure, c'est en fait par l'usage politique qui en est fait dans les processus de décisions et les procédures d'évaluation ex-ante des grands projets."* Une récente revue bibliographique actualise cette position, en cherchant à identifier par la comparaison de la littérature académique et non-académique *"les raisons d'une telle déconnexion entre la littérature scientifique et le discours des politiques"* (BAZIN et al., 2011, p.216). OFFNER (1993, p.239) préfère donc avancer la notion de *congruence*, qui renvoie à l'idée d'homologie structurale : *"On s'affranchit, de cette façon, du rapport de cause à effet (de la poule et de l'œuf...) au profit d'un modèle d'adaptation réciproque : le TGV ne provoque pas la création des technopoles mais il est le mode de transport correspondant le mieux, à un moment donné, à l'apparition de nouvelles formes d'organisation spatiale des entreprises innovantes. Les transports collectifs urbains en site propre ne valorisent ni ne dévalorisent les centres-villes, mais ils constituent un élément de type européen de centralité urbaine"*.

Cette notion de congruence et la proposition d'un modèle d'adaptation réciproque entre urbanisation et transport, reflètent une troisième prise de position, apparue plus récemment grâce aux apports de nouveaux travaux quantitatifs. Pour ce troisième courant, la structuration et le développement d'un réseau de transport se dessinent en fonction de la trame existante de la hiérarchie urbaine, mais par effet retour, la croissance urbaine est ensuite stimulée par l'évolution de l'accessibilité et la meilleure connexion au réseau de transport innovant. Se définit ainsi une *coévolution* des réseaux de transport et des hiérarchies urbaines : *"L'articulation entre réseau de communication et réseau de villes se décline alors en terme de "coévolution" (Paulus 2004, Pumain 2008), d'interdépendances fortes entre deux formes dont les niveaux hiérarchiques coïncident."* (BRETAGNOLLE, 2009, p.150). D'une part, le développement des réseaux de transport innovants suit des logiques territoriales identifiables et caractéristiques (suivant une diffusion hiérarchique dans le système de villes), il connecte d'abord les villes aux croissances les plus fortes (PUMAIN, 1982; BRETAGNOLLE, 2009); et d'autre part, les réseaux de transport innovants (réseau routier puis ferroviaire) *"façonnent, pour une part non négligeable même si elle est impossible à quantifier, les dynamiques relatives des villes dans les décennies qui suivent leur achèvement"* (BRETAGNOLLE, 2005, p.320). Ce concept de coévolution s'inscrit dans la théorie évolutive urbaine (PUMAIN et MORICONI-EBRARD, 1997) (c.f. section 1.5.2). En effet, cette théorie souligne l'importance des interactions entre les villes dans les évolutions de chaque ville et replace le fonctionnement d'une ville au sein du système dynamique et complexe formé par les villes. La place relative de chaque ville dans le système de villes,

en fonction de sa connexion aux réseaux de communication, conditionne son *pouvoir d'interaction* avec les autres entités du système de villes, et *a fortiori* influence son évolution. Aussi, d'après la théorie évolutive urbaine, les développements spatiaux et temporels des réseaux de communication innovants jouent un grand rôle dans l'explication de l'évolution des systèmes de villes.

5.1.2 Un débat aux implications complexes et multi-échelle difficiles à trancher

Si ce débat reste entier, c'est qu'il est très difficile de démontrer avec des données empiriques la causalité directe entre le gain en accessibilité d'un lieu (grâce à une meilleure connectivité au réseau de transport) et la croissance économique et/ou démographique de ce même lieu. L'hypothèse d'une boucle de rétroaction positive entre accessibilité et croissance économique est très difficile à valider. D'un côté de la boucle de rétroaction, l'effet de la taille d'un lieu sur l'évolution de son accessibilité, est prouvée (c.f. section 5.1.4). Cependant l'autre composante de la boucle de rétro-action, l'effet de l'évolution de l'accessibilité d'un lieu sur sa croissance, est très difficile à montrer : "*One of the major unresolved research issues in transport is the question as to whether transport infrastructure investment promotes economic growth at the regional and local levels*" (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p.209).

OFFNER (1993, p.237) propose une explication à cette difficulté. Elle siège dans la production d'un raisonnement *toutes choses égales par ailleurs* que la comparaison entre un *avant* la mise en place d'une infrastructure de transport et un *après* ne permet pas. Pour fonder une démonstration formelle, il faudrait pouvoir raisonner en comparant deux états (avec et sans infrastructure) d'une même situation sous les mêmes conditions (sociologiques, politiques, économiques, etc.) à un même moment donné. Ce raisonnement implique donc la comparaison entre un état observé et un état virtuel qui est très difficile à définir car il nécessite d'isoler l'effet du réseau parmi tous les autres effets possibles sur la croissance. C'est d'ailleurs l'enjeu des études économiques portant sur les répercussions économiques locales d'investissements dans les transports : "*the terms economic development and economic growth cover the long-term increase in economic activity which can be attributed to the specific investment, and which can be shown to be an addition to the direct transport benefits and not plainly their capitalised value*" (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p. 209).

La difficulté à démontrer les effets retour des infrastructures de transport sur le développement urbain réside aussi dans leurs implications multi-échelle. En effet, au moins deux niveaux géographiques sont présents : si certains scientifiques se focalisent d'abord sur le niveau local et régional, d'autres se concentrent sur le territoire national voire sur le

système de villes dans son ensemble. Deux questions distinctes se posent alors. À l'échelle micro-géographique, on cherche à comprendre les liens entre l'accessibilité/centralité d'un lieu et sa croissance économique ou démographique : *l'investissement dans une nouvelle infrastructure de transport, et donc l'amélioration de l'accessibilité d'un lieu, a-t-il un impact sur la croissance économique de ce lieu?* A l'échelle macro-géographique, on cherche à comprendre le lien entre la structure/spatialisation de la hiérarchie urbaine et la structure/spatialisation du réseau de communication : *existe-il un effet structurant des réseaux de transport sur les systèmes de peuplement?* Ces deux prises de vue mobilisent des données empiriques, des raisonnements et donc des démonstrations bien distincts, alors même que le jeu des interactions entre les niveaux géographiques les rendent dépendants l'un de l'autre. En effet, il ne peut exister un effet structurant des réseaux de transport sans qu'il n'existe en amont un effet de l'accessibilité sur la croissance économique et démographique d'un lieu. On met donc là en évidence un problème multi-échelle dont les effets sont souvent très complexes : *"It should be remembered that accessibility is a relative concept and that infrastructure investment in one location may help that location, but at the expense of a competitive location. Within a metropolitan area the net effect may be marginal"* (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p.217).

Dans le contexte de la conception du modèle SimpopNet, et plus généralement celui de cette thèse consacrée à la modélisation d'hypothèses relatives à la théorie évolutive urbaine, nous prenons position pour l'existence d'une coévolution entre réseau de transport et système urbain. Pour les besoins de la modélisation et la définition des mécanismes simulés, nous avons donc cherché à identifier dans les travaux scientifiques relatifs au lien entre territoires et réseaux de transport les faits stylisés qui viendraient corroborer le processus de coévolution. Ces faits stylisés de la coévolution peuvent être définis et représentés à plusieurs échelles. Dans la section 5.1.3 les faits stylisés à l'échelle macro-géographique résument les liens de causalité mis en évidence entre le développement sur un large territoire d'une nouvelle infrastructure de transport et la modification de la structure spatiale de la hiérarchie urbaine. La section 5.1.4 présente en faits stylisés les conclusions scientifiques sur les liens possibles de causalité à l'échelle micro-géographique entre la modification locale de l'accessibilité et la croissance économique et démographique.

5.1.3 Les faits stylisés au niveau macro-géographique de la coévolution entre le réseau de transport et la croissance urbaine

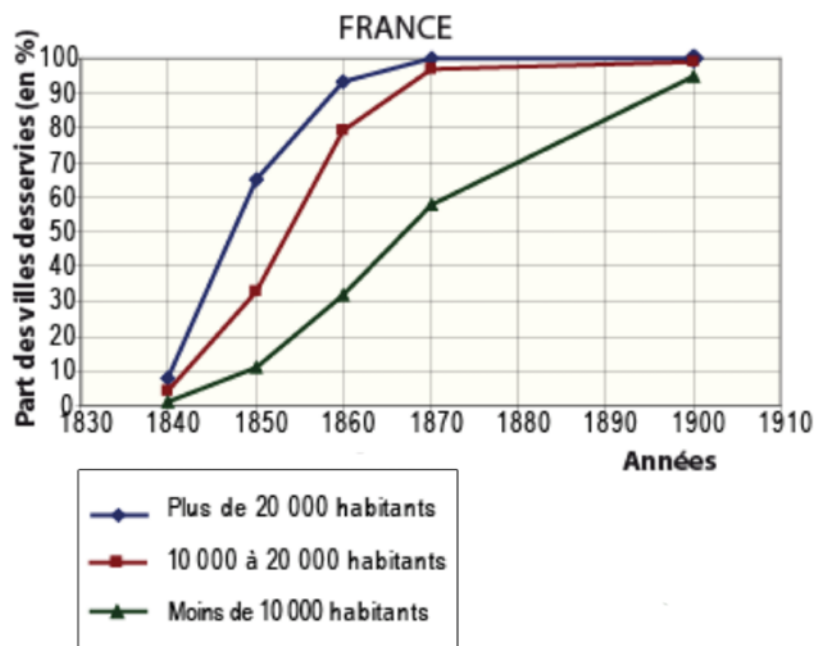
Avec les innovations techniques, de nouveaux modes de transport se sont développés : routes empierrées, routes postales, chemins de fer, autoroutes, TGV, lignes aériennes, etc. Les infrastructures nécessaires à ces nouvelles technologies se sont peu à peu diffusées sur

le territoire⁴, augmentant les vitesses de circulation et bousculant la structure spatiale des réseaux de transport préexistants. Dans le premier chapitre de cette thèse, nous avons consacré la section 1.3.5 aux effets territoriaux de l'augmentation des vitesses de transport au cours des vingt derniers siècles. Plus précisément, nous avons présenté l'évolution des théories scientifiques relatives aux effets territoriaux de la contraction de l'espace-temps. En effet, dès le début du XX^e siècle, plusieurs théories établissent un lien entre l'accroissement des vitesses, l'allongement des portées des échanges et l'augmentation des inégalités entre les tailles de villes, c'est à dire un lien entre la contraction de l'espace-temps et la hiérarchisation du système de villes. Plusieurs processus participeraient à ce lien de causalité. Nous limitons notre étude aux réseaux d'infrastructures de transport innovants, c'est-à-dire qui permettent une augmentation des vitesses de liaisons et/ou une augmentation des capacités de charge des échanges, tel que le développement des routes postales au XVIII^e siècle ou le développement du chemin de fer à la révolution industrielle. Cinq grands faits stylisés peuvent ainsi être identifiés :

1. La diffusion hiérarchique du réseau innovant De nombreux travaux ont montré que la diffusion d'un réseau innovant de transport suit les mêmes étapes que celles décrites dans la théorie de la diffusion spatiale des innovations de HÄGERSTRAND (1953). En effet, le taux de villes desservies par un réseau innovant au cours du temps suit une courbe logistique, comme il a été démontré pour le réseau des routes postales au XVIII^e siècle (BRETAGNOLLE, 2009, p.137) et pour le réseau ferré (c.f. figure 5.1) (PUMAIN, 1982 ; BRETAGNOLLE, 2009). La figure 5.1 montre par ailleurs que les plus grandes villes sont d'abord desservies par le réseau en développement, ce réseau se diffuse ensuite suivant l'ordre de la hiérarchie urbaine. La diffusion hiérarchique des réseaux de transport innovant a été mise en évidence à de multiples reprises (PUMAIN, 1982 ; BRETAGNOLLE, 2009 ; BRETAGNOLLE, 2003).

2. L'accroissement des portées des échanges Avec les innovations successives dans le domaine des transports, les vitesses de communication à longue distance ont grandement augmenté : "*La vitesse moyenne des liaisons entre Paris et les grandes villes de province est multipliée par 100 entre 1800 et nos jours, passant d'environ 5km/h à environ 70km/h en 1900 et 500km/h en 2002*" (BRETAGNOLLE, 2003, p.310). Si l'on considère des distances-temps (i.e. le temps nécessaire pour aller d'un point à un autre), il semble que les grandes villes reliées par ces liaisons rapides se sont *rapprochées* : "*Alors qu'en 1760 aucune ville n'est située à moins d'une journée de Paris, en 1860 l'ensemble de la France peut être parcouru en moins d'une journée quelle que soit la direction adoptée, et l'ensemble de*

4. Nous limitons dans cette thèse nos exemples au cas de la France. Ces conclusions sont souvent généralisables à d'autres territoires ayant connu des évolutions analogues de développement urbain.



A.Bretagnolle, UMR Géographie-cités, 2009

Figure 5.1 – Diffusion hiérarchique de l'innovation ferroviaire en France : évolution du taux de desserte des villes par classe de tailles, source (BRETAGNOLLE, 2009, p.156)

l'Europe aujourd'hui." (BRETAGNOLLE, 2003, p.311). Les portées des échanges se sont considérablement accrues. Cependant, comme l'innovation dans les vitesses de transport suit une diffusion hiérarchique, l'accroissement des portées des échanges touche d'abord les très grandes villes, les transformant en "*sortes de têtes de pont reliées aux autres grandes villes*" (BRETAGNOLLE, 2009, p.105).

3. La simplification du réseau de transport par le bas de la hiérarchie Comme la diffusion des innovations dans les transports se déroule suivant la hiérarchie des villes, ce sont les villes les plus grandes et celles présentant les meilleurs indices de croissance qui sont desservies par les liaisons les plus rapides. Grâce aux progrès techniques, les liaisons se font à plus longues distances et nécessitent de moins en moins d'étapes (besoins en approvisionnement réduits). Pour gagner en vitesse, le nombre d'étapes est justement réduit au minimum. Cette simplification du réseau, par réduction progressive du nombre d'étapes et donc du nombre de lieux desservis, se fait au détriment des plus petites villes. Il s'opère un réel processus de court-circuitage progressif des petites étapes sur les réseaux de transport (c.f. figure 5.2) : "*globalement, les villes qui sont court-circuitées ou qui restent mal desservies [...] sont bien les plus petites*" (BRETAGNOLLE, 2003, p.321).

Les deux derniers processus, l'*accroissement des portées des échanges* et la *simplification du réseau par le bas de la hiérarchie*, engendrent le phénomène de la *contraction de l'espace-temps*, parfaitement illustré par les cartes *froissées* (figure 5.3) de L'HOSTIS

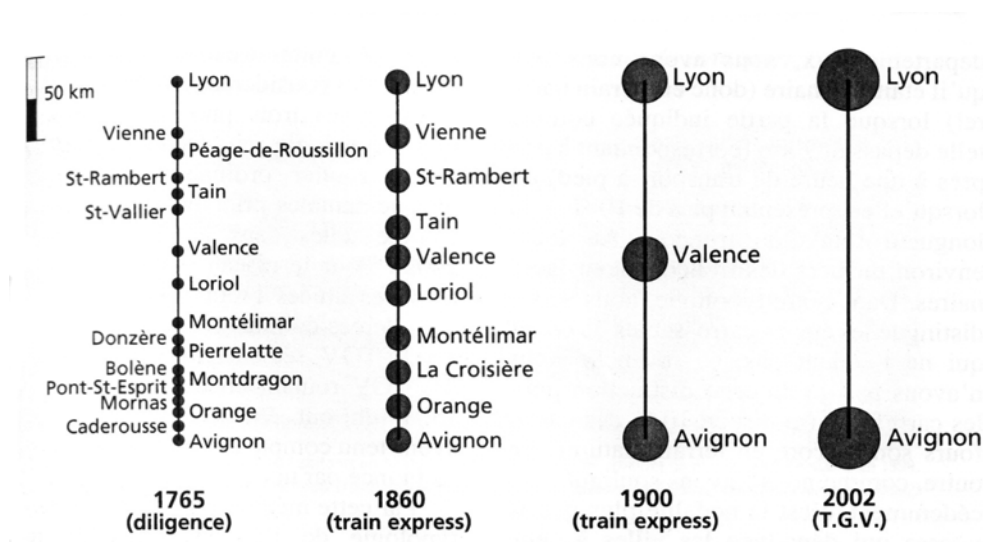


Figure 5.2 – La réduction du nombre d'étapes sur le trajet Lyon-Avignon entre 1765 et 2002, source (BRETAGNOLLE, 2003, p.313)

(1996). Sur ces cartes froissées de la France figurent les distances en temps de transport entre les principales villes françaises suivant les différents niveaux de vitesse de circulation selon le réseau considéré (TGV, autoroutes, routes). Plus le transport considéré est rapide, plus les distance-temps sont courtes et plus la carte se froisse pour évoquer la contraction de l'espace-temps. Si on ajoute à ce phénomène l'effet de la diffusion hiérarchique des innovations dans les transports on peut comprendre un quatrième fait stylisé : la hiérarchisation progressive du système villes/transport.

4. Des réseaux de communication de plus en plus hiérarchisés et discriminants

Avec l'apparition et l'adoption de nouvelles infrastructures de transport, une hiérarchisation progressive des liaisons entre les villes et des vitesses sur ces liaisons s'opère. Cette hiérarchisation du réseau est de plus en plus discriminante pour les petites villes. Par exemple, le tableau 5.1 montre que les écarts de vitesse des liaisons entre Paris et les principales villes françaises se creusent au fur et à mesure de l'apparition et du développement de nouveaux réseaux de transport : "*Les liaisons entre Paris et Le Havre, Brest, Limoges ou Clermont deviennent relativement moins performantes que celles réalisées vers Lyon, Marseille, Bordeaux ou Lille*" (BRETAGNOLLE, 2009, p.133). Ainsi, bien que l'accessibilité globale à l'échelle du territoire s'accroisse avec les progrès dans les moyens de transport, les inégalités de desserte perdurent et s'accroissent avec les innovations.

D'après de nombreuses théories (c.f. section 1.3.5), la combinaison de ces quatre processus que nous avons caractérisés en termes de faits-stylisés aurait des conséquences visibles sur l'organisation spatiale du système de peuplement.

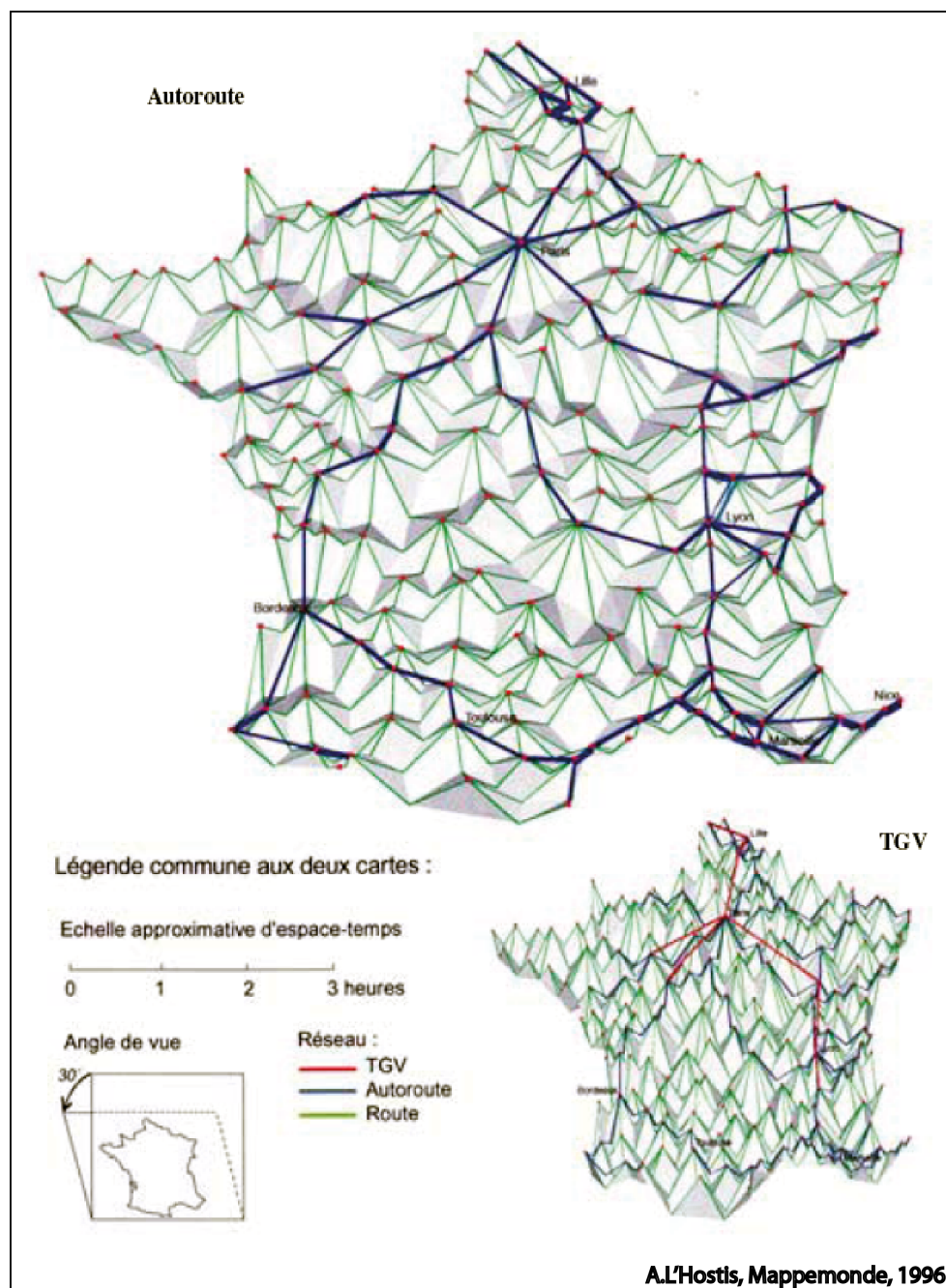


Figure 5.3 – Cartes *froissées* de l'autoroute et du TGV en France selon une échelle distance-temps, source (L'HOSTIS, 1996, p.40)

Année	Diligence	Train	Avion
1814	3		
1834	8		
1870		12	
1900		14	
1930		11	
1950		8	
1970		10	27
2000		13	15

Tableau 5.1 – Coefficients de variation (en %) des vitesses de liaison entre Paris et les principales villes de provinces⁵, source (BRETAGNOLLE, 2003, p.312)

5. La mise en espacement du territoire et la hiérarchisation du système de villes BRETAGNOLLE (1999) souligne les liens existant entre la vitesse des échanges, l'espacement et la taille des villes. L'accroissement des vitesses et des portées des échanges a un effet restructurant sur le territoire. On parle alors de *mise en espacement du territoire*, c'est-à-dire d'une augmentation des distances moyennes entre les villes possédant les mêmes types de fonction urbaine : "*En améliorant l'accessibilité et donc les possibilités de rayonnement des villes, en accroissant la portée et le volume de leurs activités, la nouvelle infrastructure a favorisé une augmentation de la taille et de l'espacement des centres correspondant à un niveau donné de fonction.*" (PUMAIN, 1982, p.59). Cette mise en espacement du territoire serait un moteur de la hiérarchisation du système de villes. D'après la théorie évolutive urbaine, l'accroissement du rayonnement des villes agit sur les dynamiques de compétition interurbaine. Il en résulte une augmentation du différentiel de taille entre les grandes villes et les petites villes : "*La mise en espacement progressive des nœuds d'organisation du territoire, ces villes qui assurent les fonctions essentielles de commandement, de relais et de desserte, donne la mesure du déclin relatif des villes intermédiaires, anciens nœuds d'organisation dans les réseaux de transport moins rapides [...]. Vitesse et hiérarchie urbaines se trouvent ainsi étroitement imbriquées, à travers des liens mettant en jeu les positions relatives des villes dans l'espace.*" (BRETAGNOLLE, 2003, p.310).

Ainsi, la contraction de l'espace-temps, en simulant un rapprochement relatif des villes et un accroissement des aires d'influence des villes, contribuerait au processus de hiérarchisation du système de peuplement, à la fois par le bas de la hiérarchie (par court-circuitage des petites villes-étapes), et par le haut (par la captation précoce des innovations dans les transports qui favorise les activités économiques des grandes villes). Cependant ce cinquième fait stylisé présuppose l'hypothèse qu'au niveau micro-géographique de la ville, une meilleure connectivité aux réseaux innovants favorise la compétitivité urbaine car elle

favoriserait la captation des innovations moteurs de la croissance. Or, comme nous l'avons évoqué précédemment, cette hypothèse de l'effet positif local du gain en accessibilité ou en connectivité aux réseaux innovants est très difficile à démontrer.

Les faits stylisés, au niveau macrogéographique, de la coévolution entre réseau de transport et croissance urbaine peuvent se résumer par le schéma de la figure 5.4. En premier lieu, il existe une forte correspondance entre la structure spatiale et hiérarchique de la trame urbaine et celle des réseaux de transport. Cette correspondance semble se nourrir d'un effet de rétroaction des structures l'une sur l'autre. La structure spatiale et hiérarchique de la trame urbaine influence la structure du réseau, puisque la constitution de la structure du réseau innovant de transport suit un processus de diffusion hiérarchique dans le système de villes. En retour, l'organisation des réseaux de transport aurait un rôle restructurant sur la trame urbaine par un effet moteur de mise en espacement et de renforcement de la hiérarchisation urbaine. Cet effet n'étant pas facilement démontrable (bien que fortement pressenti), il est figuré en pointillé sur le schéma. Finalement, l'*"accroissement des inégalités entre les tailles de villes reflète, autant qu'il suscite, l'accroissement des inégalités entre les positions relatives des villes sur les réseaux de transport"* (BRETAGNOLLE, 1999, p.170).

5.1.4 Les faits stylisés au niveau micro-géographique de la coévolution entre les réseaux de transport et la croissance urbaine

Les effets au niveau micro-géographique de la boucle de rétroaction entre implantation des réseaux de transport et croissance urbaine sont difficiles à démontrer car le raisonnement *toutes choses égales par ailleurs* est très compliqué à mettre en œuvre. En effet, pour mettre en évidence la coévolution entre réseau de transport et dynamique urbaine, il faut pouvoir montrer d'une part l'effet positif de la croissance urbaine sur l'accessibilité et d'autre part l'effet positif de l'accessibilité sur la croissance urbaine. Si le premier effet est facilement démontrable, le deuxième est beaucoup plus subtil à mettre en évidence avec les données disponibles. Les économistes d'un côté et les géographes de l'autre proposent deux approches différentes pour montrer l'effet positif de l'accessibilité sur la croissance urbaine.

5.1.4.1 L'effet positif de la dynamique d'une ville sur son accessibilité

L'effet positif de la dynamique d'une ville sur son accessibilité est identifiable lors de l'apparition et de la diffusion d'une innovation dans les réseaux de transport. Nous avons établi dans la section 5.1.3 que la diffusion des infrastructures relatives à une innovation

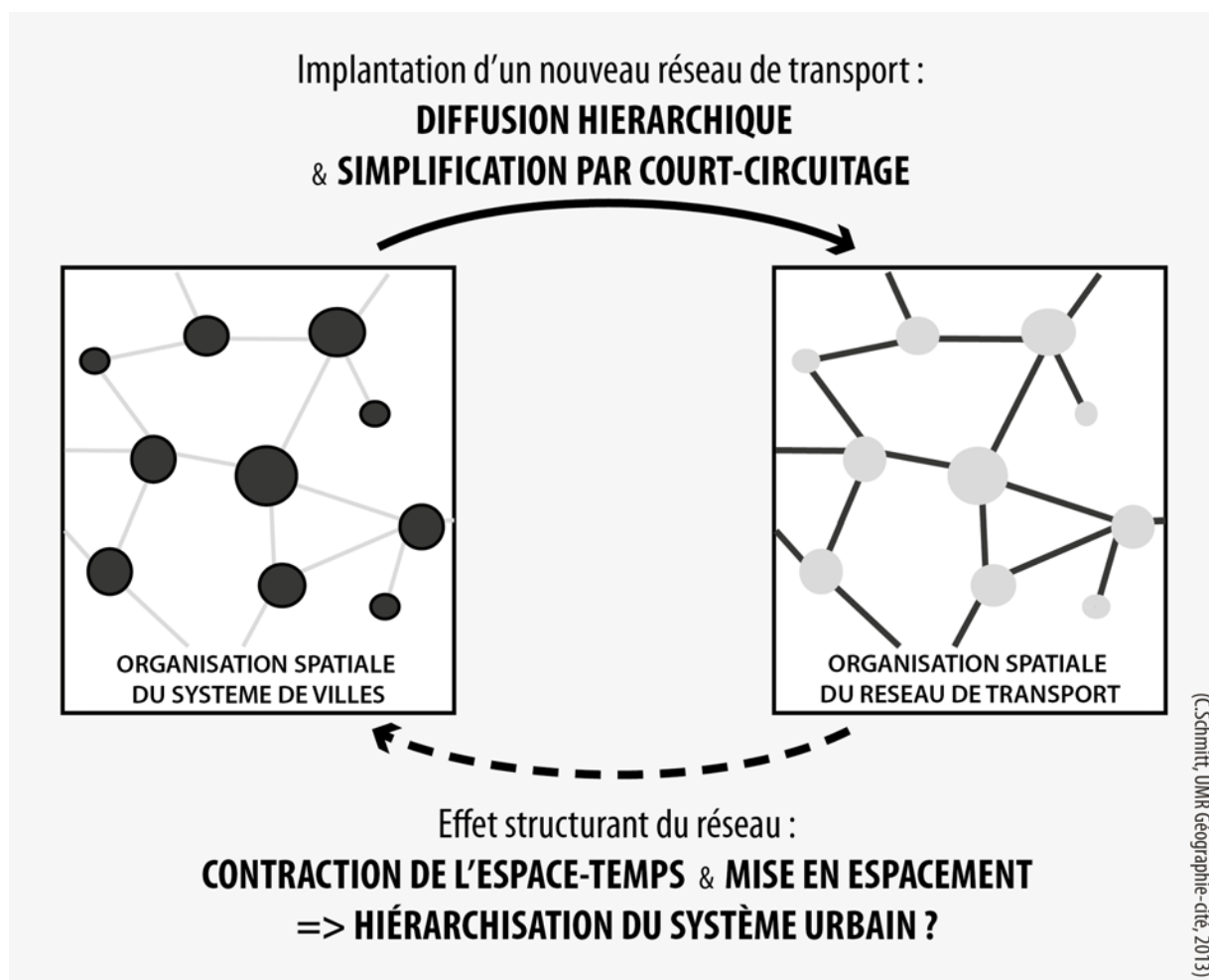


Figure 5.4 – Schématisation de la coévolution entre réseau de transport et système de villes

dans les transports suit la hiérarchie descendante du système de villes. Ce phénomène explique l'effet de la taille d'une ville sur l'évolution de son accessibilité : statistiquement ce sont les plus grandes villes qui accèdent d'abord au réseau innovant, accroissant de la sorte leur accessibilité le plus rapidement et le plus significativement par rapport au reste du système de villes. Ce processus peut s'expliquer par la notion socio-économique de rentabilité : les nouveaux segments de réseau se construisent là où existent des flux de circulation déjà importants, permettant ainsi de rentabiliser l'exploitation des nouvelles infrastructures aux coûts relatifs encore importants. Pour bien comprendre ce processus, il faut distinguer la notion d'*invention* de celle d'*innovation* : une innovation est une invention qui a été adoptée par la société. Lors des développements successifs du chemin de fer en France (du train à vapeur jusqu'au TGV), les premiers essais de chaque invention n'ont pas été réalisés autour des grandes villes (Saint-Germain, Saint-Étienne pour les premiers essais du chemin de fer, Orléans pour l'aérotrain et Belfort pour le TGV). Cependant quand certaines de ces inventions sont devenues des innovations, c'est-à-dire quand elles ont été adoptées, développées et commercialisées, leur diffusion sur le territoire français a suivi le modèle de diffusion hiérarchique (la première ligne publique et commerciale de TGV s'est construite entre Paris et Lyon). L'effet de la taille des villes sur leur accessibilité n'est pas contesté : "*Nous avons montré qu'en réalité le réseau a surtout été dessiné en fonction d'une hiérarchie de taille et de dynamisme urbain qui préexistait à son installation*" (PUMAIN, 1982, p.59).

5.1.4.2 Les évaluations des impacts économiques des investissements dans les infrastructures de transport

Les économistes développent depuis longtemps des modèles pour prévoir les retombées économiques d'investissements dans les transports. Ces modèles économiques se fondent sur des analyses de comparaison coûts-bénéfices (*Cost-effectiveness analyses, Benefit-cost ration, Benefit-cost analysis, Risk-Benefit analysis, Multi-criteria analysis, etc.*) (BANISTER et BERECHMAN, 2001). Ces quantifications sont évaluées sur la base des changements induits par les modifications des distances-temps. En effet, les changements dans l'accessibilité d'un lieu modifient la place relative de ce lieu par rapport à tous les autres, ce qui peut avoir pour effet de modifier le comportement de localisation des entreprises, le marché de l'immobilier, le marché de l'emploi, les localisations des résidences, etc. Tous ces effets peuvent donc avoir des répercussions sur la croissance locale de l'emploi, la taille de la population locale, ou encore la diversité locale de l'activité économique par exemple. Un ensemble de méthodes analytiques sont disponibles pour estimer les impacts économiques de l'amélioration des services de transports (IACONO, LEVINSON et EL-GENEIDY, 2008). À chaque échelle d'étude et à chaque type de projet est associé un modèle économique. De façon générale, ces modèles présupposent qu'il existe plusieurs types de bénéfices écono-

miques engendrés par l'amélioration des réseaux de transport : une réduction des temps et des coûts de transport, une meilleure efficacité de la chaîne d'approvisionnement, une plus forte compétitivité, une plus grande économie d'échelle intra-entreprise, un effet d'agglomération et de réseau, etc. Ces bénéfices se répercuteraient aussi dans le coût et les prix des produits et des propriétés immobilières. Ces modèles économiques reposent donc sur le postulat que l'amélioration locale de l'accès aux réseaux de transport efficaces rend les entreprises locales plus productives, plus compétitives et donc plus profitables que les entreprises des régions moins accessibles.

GIVONI (2006) a proposé une revue des études sur l'impact économique de la connexion au réseau de trains à grande vitesse (TGV et Shinkansen). Un premier constat abonde dans le sens de la diffusion hiérarchique de ces technologies : les services de trains à grande vitesse s'implantent d'abord dans les grandes villes. Cependant un deuxième constat nuance notre hypothèse initiale de coévolution entre accessibilité et croissance urbaine : au niveau micro-géographique le gain d'accessibilité grâce à de meilleures connexions aux réseaux de transport n'a pas systématiquement un impact positif sur les économies locales. Si dans certains cas le gain d'accessibilité conduit à un développement économique, dans d'autres il a plutôt eu l'effet de drainer le lieu de ces activités économiques au profit des autres régions. M. Givoni conclut donc que la connexion au réseau de trains à grande vitesse ne conduit pas systématiquement au développement économique. BANISTER et BERECHMAN (2001) arrivent à la même conclusion.

De même, VICKERMAN, SPIEKERMANN et WEGENER (1999) ont étudié l'effet économique potentiel de politiques de développement des transports. Ces politiques ont pour objectif de réduire les disparités économiques régionales à l'échelle européenne, et s'appuient sur le postulat qu'une amélioration de l'offre de transport et donc de l'accessibilité à l'échelle européenne aura un effet positif sur les économies marginales. Cependant les résultats de l'étude montrent que cet effet n'est pas évident et qu'au contraire ces politiques pourraient accentuer les inégalités inter-régionales. Ils expliquent ce phénomène par deux effets. D'abord, les premières zones concernées par le développement de nouvelles infrastructures sont celles déjà en position de force économique. D'autre part, l'amélioration des connexions entre les zones très accessibles et celles présentant une moins bonne accessibilité peut certes faciliter la pénétration des produits des régions plus isolées dans les marchés des régions centrales, mais permet aussi aux producteurs des régions centrales d'envahir les marchés des régions périphériques qui étaient auparavant, et en ce sens, mieux protégés par leur éloignement dans les réseaux.

BANISTER et BERECHMAN (2001) proposent un cadre d'analyse pour comprendre ces effets contradictoires. Les gains en accessibilité d'un lieu ne peuvent conduire au développement économique que sous un ensemble nécessaire de conditions socio-politico-économiques favorables (c.f. figure 5.5). Les auteurs identifient ainsi une typologie des

impacts possibles de l'investissement dans le secteur des transports en fonction du contexte politico-économique à l'échelle régionale (c.f. figure 5.6). Selon cette typologie, un gain local en accessibilité ne pourra engendrer une croissance économique que dans un contexte politico-économique dynamique et ouvert.

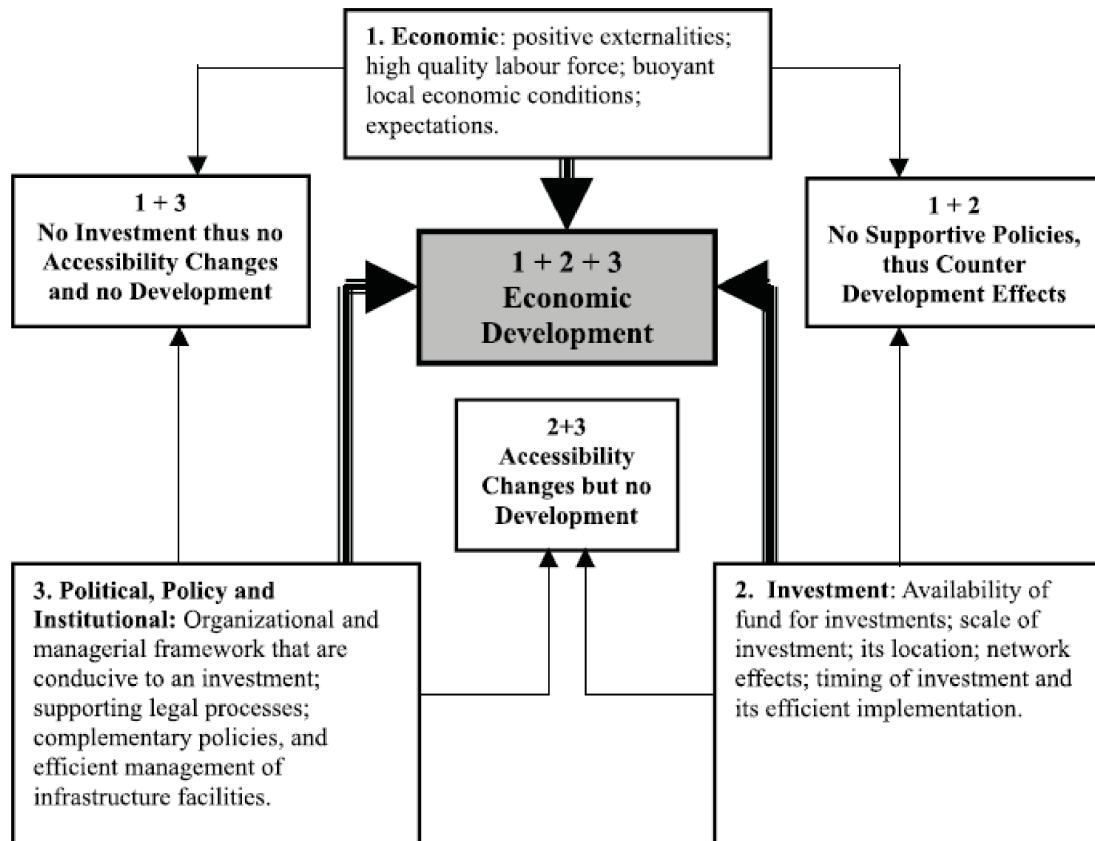


Figure 5.5 – Ensemble des conditions nécessaires pour que l'investissement local dans les infrastructures de transports conduise à un développement économique local, source (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p.210)

Cette brève revue de travaux en sciences économiques montre que si beaucoup de modèles et de raisonnements sur les impacts des investissements dans le secteur des transports acceptent leur effets positifs sur l'économie locale, les études empiriques ne sont pas aussi formelles. Le lien de causalité entre gain en accessibilité et croissance économique n'est pas encore empiriquement démontré et dépend surtout du contexte socio-politico-économique dans lequel il s'inscrit. Ainsi, comme nous venons de l'évoquer, les investissements dans le secteur des transports ne peuvent avoir un effet positif que dans un contexte politico-économique dynamique et ouvert. Certains pourraient y voir les marques de la boucle de rétroaction positive entre accessibilité et croissance urbaine : plus une économie urbaine est dynamique et ouverte, plus elle pourra influencer positivement l'accessibilité et plus l'effet retour sur son économie sera fort. Réciproquement, le raisonnement inverse est aussi possible : plus une économie urbaine est faible et moins elle pourra exercer d'influence sur

Open Dynamic Systems	
1. Economic self-sufficiency in these regions with production under strong local ecological controls. <i>Transport investment important and will have the maximum impact in these systems.</i>	2. International and national markets with strong conditions for further growth. <i>Transport investment already at a high level and will support growth – but not a necessary condition.</i>
Inaccessibility	Accessibility
<i>Poor transport may have contributed to decline, but on its own it will not revive these regions.</i> Static local areas which are isolated with declining economies.	<i>Infrastructure good along corridors, but further investment will have little impact, as economic conditions are weak.</i> Accessibility restricted to corridors and regions in decline, except at key interchanges.
4.	3.
Closed Static Systems	

Figure 5.6 – Typologie des impacts possibles de l'investissement dans le secteur des transports en fonctions du contexte politico-économique à l'échelle régionale, source (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p.213)

l'accessibilité, ce qui se ressentira, en retour, sur son économie.

5.1.4.3 Les travaux géographiques sur la corrélation entre la dynamique urbaine et l'évolution de l'accessibilité

La question des effets structurants des réseaux de communication à l'échelle micro-géographique est aussi présente dans les travaux de géographie urbaine. Dans ces travaux, ce ne sont pas tant les impacts économiques qui sont étudiés mais plutôt la dynamique urbaine en termes de dynamiques démographiques. La taille démographique d'un centre urbain étant un bon indicateur de la complexité urbaine (c.f. section 1.3.3), l'évolution de la population urbaine est considérée dans ces études comme une bonne approximation de la dynamique des villes. Ces études se situent essentiellement à l'échelle de la ville, ce niveau étant le plus fin disponible pour un recensement fiable sur le long terme de l'indicateur de taille de population.

Les différentes études sur les liens entre l'accessibilité et la dynamique démographique urbaine montrent qu'une corrélation existe entre la taille d'une ville, son accessibilité et sa croissance démographique : *"Tout au long du XIX^e siècle, les interdépendances entre la position des villes dans la hiérarchie des tailles, les modalités de leurs insertions dans le réseau ferré et l'intensité de la croissance de leur population sont évidentes. Sans être*

très élevées, les corrélations calculées entre les indicateurs de ces trois grands groupes de caractéristiques urbaines sont toujours significatives [...] Elles montrent que les villes ont connu une croissance d'autant plus forte qu'elles étaient grandes, que l'arrivée du chemin de fer a été précoce, que le carrefour des voies qu'elles constituent est important" (PUMAIN, 1982, p.54).

Toutefois, il a été prouvé qu'il peut exister une corrélation positive, bien que faible et non-systématique, entre la taille de la ville et son taux de croissance (c.f. 5.7) : dans ce cas, plus la ville est grande et plus son taux de croissance sera élevé. Mais si la taille d'une ville peut influencer sa croissance et donc l'évolution de sa taille, et si sa taille influence son l'accessibilité (le deux points sont démontrés) alors comment faire la différence entre l'effet de la taille sur la croissance et l'effet des modifications de l'accessibilité sur la croissance, si celui-ci existe ? Faut-il imputer le dynamisme démographique des villes ayant augmenté leur accessibilité au fait de leur meilleure insertion dans les réseaux de transport ou au fait que cette meilleure insertion a touché les plus grandes villes et donc celles qui étaient déjà les plus dynamiques ? Cette question revient à différencier statistiquement les situations A et B de la figure 5.8, alors que celles-ci pourraient produire *a priori* les mêmes données empiriques de variations de taille et d'accessibilité. Cependant, il semblerait que si le mécanisme B avait lieu (effet positif de la taille sur elle-même), les corrélations observées entre taille et croissance urbaine seraient beaucoup plus fortes. En outre, le mécanisme A pourrait expliquer ces corrélations observées de plus faible ampleur.

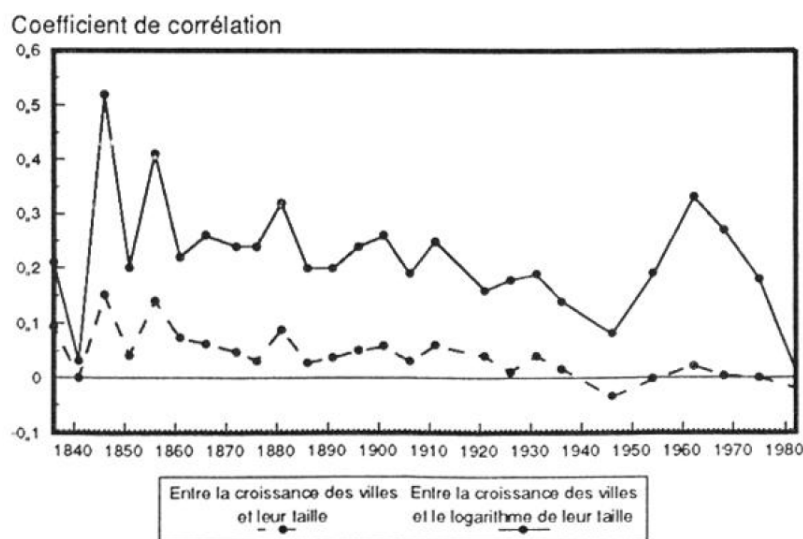


Figure 5.7 – Corrélation entre le taux de variation de la population des villes Françaises et leur taille de 1831 à 1982, source (GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990, p.12)

Pour éliminer l'effet de la taille des villes, PUMAIN (1982, p.56) a comparé sur différentes périodes les taux de croissance des villes déjà desservies, récemment desservies, ou pas encore desservies par le chemin de fer, à l'intérieur de chaque classe de taille des villes.

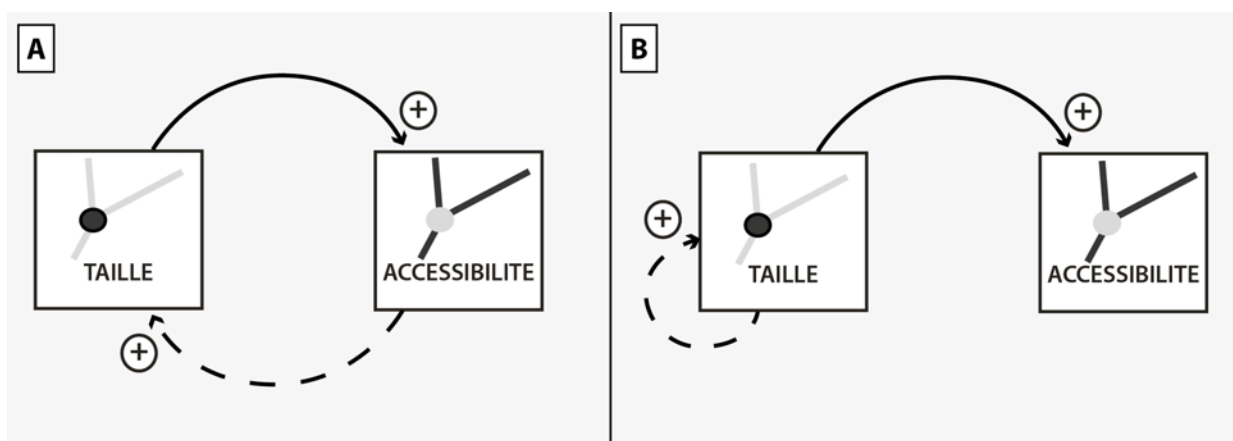


Figure 5.8 – Deux schématisations possibles de la coévolution entre taille urbaine et accessibilité

Et les conclusions ne sont pas franches : *"Si l'on raisonne toutes choses égales par ailleurs quant à la taille des villes, l'avantage apporté par la desserte ferroviaire à la croissance de la population des villes n'apparaît pas d'une netteté absolue, et cela quelle que soit la tranche de taille considérée. Le rôle du chemin de fer comme facteur (ou révélateur) de discrimination de la croissance des villes est patent si l'on confronte l'évolution des villes qui n'ont jamais été desservies et celle des villes de taille comparable qui ont été insérées dans le réseau à un moment donné du XIX^e siècle. En revanche, il ne différencie pas systématiquement les évolutions démographiques urbaines parmi les villes desservies, si l'on considère des villes de taille comparable."* De plus, les taux de variation moyens annuels démographiques pour chaque ville après l'arrivée du chemin de fer ne sont pas systématiquement plus élevés que les taux enregistrés avant. PUMAIN (1982, p.59) en conclut que : *"Si l'on considère les villes françaises dans leur ensemble (ce qui n'exclut pas l'observation de cas particuliers où la relation est évidente), la présence ou l'absence de desserte par le réseau de chemin de fer n'a pas été un facteur déterminant de l'évolution démographique."*

Pourtant des études plus récentes réalisées à partir de données plus complètes suggèrent l'existence d'effets structurants de réseau (BRETAGNOLLE, 2003 ; BRETAGNOLLE, 2009), contrairement aux conclusions des travaux antérieurs (PUMAIN, 1982 ; LAROQUE et GIGAUDON, 1985 ; LEPETIT, 1988 ; OFFNER, 1993). Cette différence est due aux changements du cadre d'étude temporel et géographique que propose A. Bretagnolle. En effet, ses travaux compilent *"la croissance urbaine dans les décennies qui ont suivi l'achèvement des nouveaux réseaux (c'est-à-dire entre 1831 et 1872, pour le réseau routier, et entre 1911 et 1954 pour le réseau ferroviaire) et non entre la création et l'achèvement du réseau (c'est-à-dire entre 1780 et 1830, pour le réseau routier, et entre 1831 et 1911 pour le réseau ferroviaire dates choisies dans les études susmentionnées). En outre, les analyses ont porté sur l'ensemble du système urbain et pas uniquement sur les petites villes (c'est le cas de l'étude de Laroque et Gigaudon, 1985)"* (BRETAGNOLLE, 2003, p.319). Les résultats de

cette étude permettent de conclure qu'"[h]ormis le cas des villes à l'écart des nouveaux réseaux [...], l'ensemble des villes desservies par la route en 1836 et par le chemin de fer en 1900 connaissent, en moyenne, une croissance fortement corrélée à la qualité de leur desserte" (BRETAGNOLLE, 2003, p.319). Néanmoins ces résultats viennent surtout confirmer la corrélation déjà mise en lumière entre niveau d'accessibilité et croissance démographique, et n'apportent pas de démonstration formelle du lien de causalité de l'effet de la modification de l'accessibilité sur la croissance démographique.

La méthode permet pourtant de mettre en lumière un autre fait stylisé à prendre en compte dans la démonstration de la boucle de coévolution : l'effet cumulatif de l'accessibilité. En effet, l'observation de l'évolution de l'accessibilité des villes sur la longue durée (trois réseaux successifs : réseau routier, réseau ferré et avion) permet de mettre en évidence une forte stabilité entre évolution de l'accessibilité, taille et croissance urbaine : *"Les deux tableaux [c.f. figure 5.9] présentent une relation extrêmement forte entre l'évolution de l'accessibilité, la taille des villes et leur croissance relative. Globalement, les villes qui sont court-circuitées ou qui restent mal desservies (partie supérieure gauche des tableaux) sont bien les plus petites (les populations sont très homogènes et bien reflétées par la moyenne) et sont en déclin relatif. À l'opposé, les villes qui connaissent un gain d'accessibilité ou réussissent à se maintenir en positions de force sur le nouveau réseau (partie inférieure droite des tableaux) sont, en moyenne, les plus grandes et ont une croissance plus rapide que celles de l'ensemble du système urbain"* (BRETAGNOLLE, 2003, p.321).

5.1.4.4 Résumé de l'état des connaissances sur la boucle de coévolution entre accessibilité et dynamique urbaine à l'échelle micro-géographique

La démonstration formelle de la boucle de rétro-cation positive entre accessibilité et dynamique urbaine à l'échelle micro-géographique est très difficile à mettre en œuvre. Les données empiriques à disposition ne permettent pas encore de développer un raisonnement *toutes choses égales par ailleurs* qui serait pourtant nécessaire pour isoler l'effet structurant des réseaux parmi tous les autres effets stimulants possibles sur la croissance (telles que la taille urbaine, la santé économique, etc.). Cependant un faisceau d'indices conduit les scientifiques à persister dans la recherche de cette démonstration et pousse certains auteurs à conclure que les réseaux *"façonnent, pour une part non négligeable même si elle est impossible à quantifier, les dynamiques relatives des villes dans les décennies qui suivent leur achèvement"* (BRETAGNOLLE, 2003, p.320). La coévolution au niveau micro-géographique entre l'accessibilité d'une ville (son niveau d'insertion dans le réseau de transport) et sa dynamique économique et démographique peut être résumée par les faits stylisés suivants :

1. Il existe un effet de la taille d'une ville sur l'évolution de son accessibilité :

1836

	Écart, étape		Carrefour lent		Carrefour rapide		Carrefour 4 voies et plus		Nombre de villes
	TVAM	Taille moyenne	TVAM	Taille moyenne	TVAM	Taille moyenne	TVAM	Taille moyenne	
Écart, étape lente	0,15	3 832	0,47	5 073	0,28	6 497	---	---	133
Étape rapide	0,19	3 991	0,42	5 097	0,50	5 922	---	---	106
Carrefour 2 voies	0,28	5 755	0,39	6 492	0,86	11 774	---	---	118
Carrefour 3, 4, 5 voies	0,40	7 632	0,62	8 847	0,78	11 654	1,13	36 537	112
Carrefour 6 voies et plus	---	---	---	---	0,89	38 320	1,07	132 208	16
Nombre de villes	190		168		106		21		485

1900

	Écart, étape routière		Carrefour routier		Étape autoroutière		Carrefour autoroutier, ou TGV ou avion		Carrefour autoroutier, TGV et avion		Nombre de villes
	TVAM	Taille moy.	TVAM	Taille moy.	TVAM	Taille moy.	TVAM	Taille moy.	TVAM	Taille moy.	
Écart, étape	0,94	5 025	0,98	6 687	1,21	6 500	1,69	12 583	---	---	223
Carrefour lent	0,87	5 547	0,93	8 394	1,09	11 625	1,33	28 426	---	---	176
Carrefour rapide	1,24	5 674	1,06	12 758	1,10	14 962	1,14	43 304	1,63	106 572	107
Carrefour 4 voies et plus	---	---	---	---	---	---	1,38	82 006	1,34	594 341	21
Nombre de villes	204		143		90		70		20		527

N-B : les taux de croissance n'ont pas été reportés lorsque les effectifs sont inférieurs ou égaux à 3. Les chiffres en gras correspondent à ceux qui sont supérieurs à la moyenne (le taux de croissance moyen est égal à 0,45 entre 1836 et 1911, 1,06 entre 1911 et 1999, la population moyenne est de 10130 habitants en 1836, 24449 habitants en 1900).

Source : Ministère des Travaux Publics (1837), Guide Chaix (1900), Atlas Michelin (2002), Indicateurs SNCF (2002), Indicateurs Air France (2002), Bulletin des Lois (1831), Dénombrement de population (1911).

Figure 5.9 – Évolution d'accessibilité d'un réseau à un autre, taille moyenne (en nombre d'habitants) et taux de variation moyen annuel (TVAM en %), source (BRETAGNOLLE, 2003, p.321)

Plus la ville est grande (ou plus elle est riche), plus elle a de chance d'acquérir rapidement une innovation lui permettant d'améliorer son niveau d'accessibilité.

2. **Il existe un effet cumulatif dans le temps de l'accessibilité d'une ville :** Plus une ville a un bon niveau d'accessibilité et plus la probabilité qu'elle le garde lors de l'apparition d'un réseau de transport innovant et sa diffusion sur le territoire est forte.
3. **Il existerait un effet de l'accessibilité d'une ville sur sa taille :** Bien que cet effet ne soit pas encore formellement démontré, beaucoup d'indices poussent à penser que plus la ville a un bon niveau d'accessibilité et plus elle augmente ce niveau d'accessibilité, plus sa croissance est forte. Cet effet se ferait cependant sentir bien après la construction de la liaison au réseau qui améliore son accessibilité et ne pourrait s'observer qu'à partir des périodes qui suivent la fin de la construction de tout le réseau en question. Il existerait donc un décalage temporel entre les deux effets de la boucle de rétroaction. En outre, les investissements dans le secteur des transports ne peuvent avoir un effet positif que dans un contexte politico-économique dynamique et ouvert.

5.1.5 Synthèse des faits-stylisés de la coévolution entre réseau de transport et dynamique urbaine : des enjeux pour le modèle SimpopNet

La description des faits stylisés de la coévolution entre le réseau de transport et la dynamique urbaine se fonde au niveau macro-géographique sur l'adéquation entre la structure spatiale et hiérarchique de la trame urbaine et celle des réseaux de transport. Cette correspondance semble se nourrir d'un effet de rétroaction des structures l'une sur l'autre. D'une part, la structure spatiale et hiérarchique de la trame urbaine influence la structure du réseau car la constitution de la structure du réseau innovant de transport suit un processus de diffusion hiérarchique dans le système de villes. D'autre part, l'organisation des réseaux de transport aurait, en retour, un effet structurant sur la trame urbaine par un effet moteur de mise en espacement et de renforcement de la hiérarchisation urbaine. Au niveau micro-géographique, si l'effet de la taille d'une ville sur son niveau d'accessibilité est facilement démontrable, le deuxième effet de la boucle de rétroaction, i.e. l'effet de l'accessibilité d'une ville sur sa taille est beaucoup plus difficile à démontrer. Les différentes études sur les liens entre l'accessibilité et la dynamique démographique urbaine montrent qu'il existe une corrélation entre la taille d'une ville, son accessibilité et sa croissance démographique. Cependant les liens de causalité sont difficiles à discerner notamment du fait de la mise en évidence d'une corrélation positive possible entre la taille d'une ville et

son taux de croissance, de l'effet cumulatif de l'accessibilité et du décalage temporel entre les deux effets de la boucle de rétroaction.

En parallèle des recherches qui s'appuient sur les données empiriques, nous proposons une autre approche fondée des modèles de simulation pour étudier ce sujet complexe. Avec cette nouvelle approche, il s'agit d'étudier par la simulation les différents liens de causalité envisageables pour expliquer la coévolution. L'enjeu d'une telle modélisation est de simuler à l'échelle micro-géographique les différents modèles de causalité envisagés et d'observer les conséquences de ces hypothèses au niveau macro-géographique. La simulation des hypothèses sur les processus micro-géographiques engendre-t-elle une organisation du niveau géographique supérieur qui soit compatible avec les données d'observation ? Cet exercice de modélisation peut aider à identifier une combinaison des mécanismes représentatifs de processus réels qui est capable d'engendrer certaines propriétés du système de villes analogues aux faits stylisés. Il s'agit d'un côté de reproduire une diffusion hiérarchique du réseau innovant sur le territoire et un court-circuitage progressif des petites villes "étapes". Et d'un autre côté, il est attendu de voir émerger une corrélation entre la taille d'une ville et son accessibilité et une hiérarchisation progressive caractéristique des systèmes de villes.

Le modèle SimpopNet, présenté dans la section 5.3, est conçu pour réaliser ces expérimentations. Il simule les hypothèses sur les processus de la coévolution à l'échelle micro-géographique dans le but de reproduire un ensemble de faits stylisés caractéristiques à l'échelle macro-géographique. Ces enjeux de modélisation sont résumés sur la figure 5.10. Sur cette figure, le modèle de la boucle de rétroaction positive au niveau micro-géographique est pris pour exemple (modèle A de la figure 5.8).

La conception du modèle SimpopNet nécessite la définition de la coévolution en termes de mécanismes à simuler : c'est-à-dire la définition d'au moins un mécanisme pour traduire l'effet de la dynamique urbaine sur le réseau de transport et la définition d'au moins un mécanisme pour traduire l'effet du réseau de transport sur la dynamique urbaine. Ces définitions peuvent s'inspirer des formes de modélisation déjà proposées que nous présentons en section 5.2.

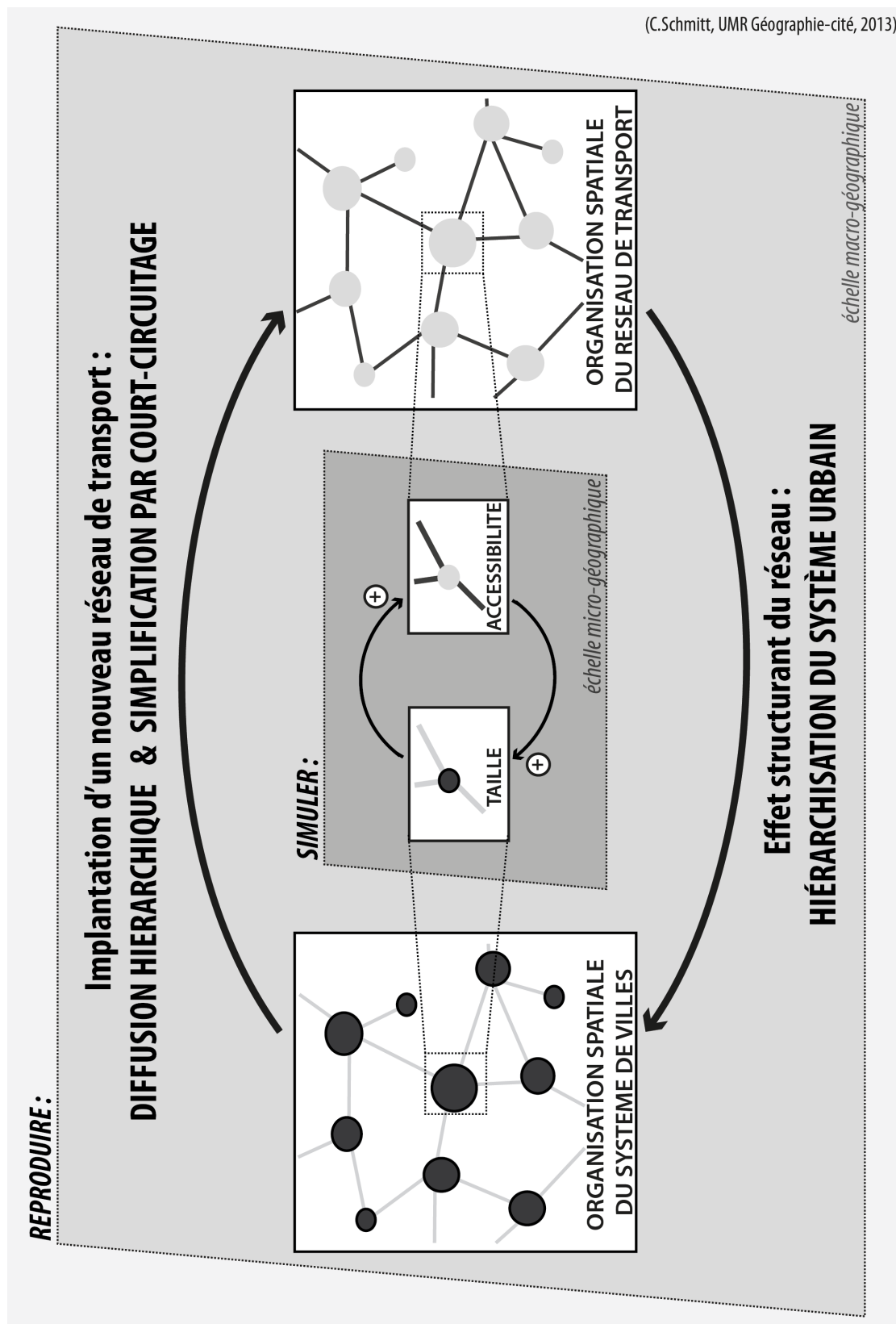


Figure 5.10 – Les enjeux de modélisation du modèle SimpopNet, exemple de la boucle de rétroaction positive au niveau micro-géographique

5.2 Une modélographie sur la coévolution entre les réseaux d'échange interurbains et les systèmes de villes

La question des liens de causalité entre croissance urbaine et évolution des réseaux de transport est un sujet épineux que nous proposons d'étudier à la lumière de modèles de simulation. Des modèles qui peuvent être reliés à cette problématique ont déjà été proposés, et sont résumés ici sous la forme d'une modélographie. Certains se focalisent sur l'impact de la structure des réseaux de transport (section 5.2.1), alors que d'autres simulent plutôt le développement des réseaux de transport en relation avec la configuration spatiale du système de peuplement (section 5.2.2). Les modèles qui rassemblent les deux effets existent, mais très peu traitent spécifiquement cette problématique à l'échelle du système de villes (section 5.2.3).

5.2.1 Les modélisations de l'effet de l'organisation du réseau de transport sur la croissance urbaine

Les modélisations de l'effet de la structure du réseau sur la croissance urbaine peuvent prendre des formes très différentes comme l'attestent les diverses propositions issues des sciences économiques ou géographiques.

5.2.1.1 Les modèles d'impact du changement d'accessibilité sur l'économie urbaine

Comme nous l'avons vu dans la section 5.1.4.2, beaucoup de travaux empiriques en économie nuancent fortement, en fonction du contexte local, l'impact positif sur la croissance urbaine de l'accessibilité au réseau de transport. Pourtant une grande proportion des travaux en économie des transports est orientée vers l'évaluation et la modélisation des retombées économiques de grands investissements dans les transports. Ces travaux se fondent sur des comparaisons coûts-bénéfices (*Cost-effectiveness analyses*, *Benefit-cost ratio*, *Benefit-cost analysis*, *Risk-Benefit analysis*, *Multi-criteria analysis*, etc.). Ces méthodes d'évaluations peuvent être résumées grâce aux schémas de la figure 5.11 proposés par BANISTER et BERECHMAN (2001), qui explicitent les hypothèses fondatrices de ces évaluations sur les formes de relations qu'entretiennent le secteur des transports, le secteur de la production et le marché de la main d'œuvre. Ces méthodes ne sont cependant pas applicables dans notre cas : dans le contexte de cette thèse, l'enjeu n'est pas de simuler tous ces effets de causalité (qui engendrent des modèles très compliqués à calibrer et ex-

périmenter), mais plutôt de retranscrire un processus global, un mécanisme synthétique de ces effets.

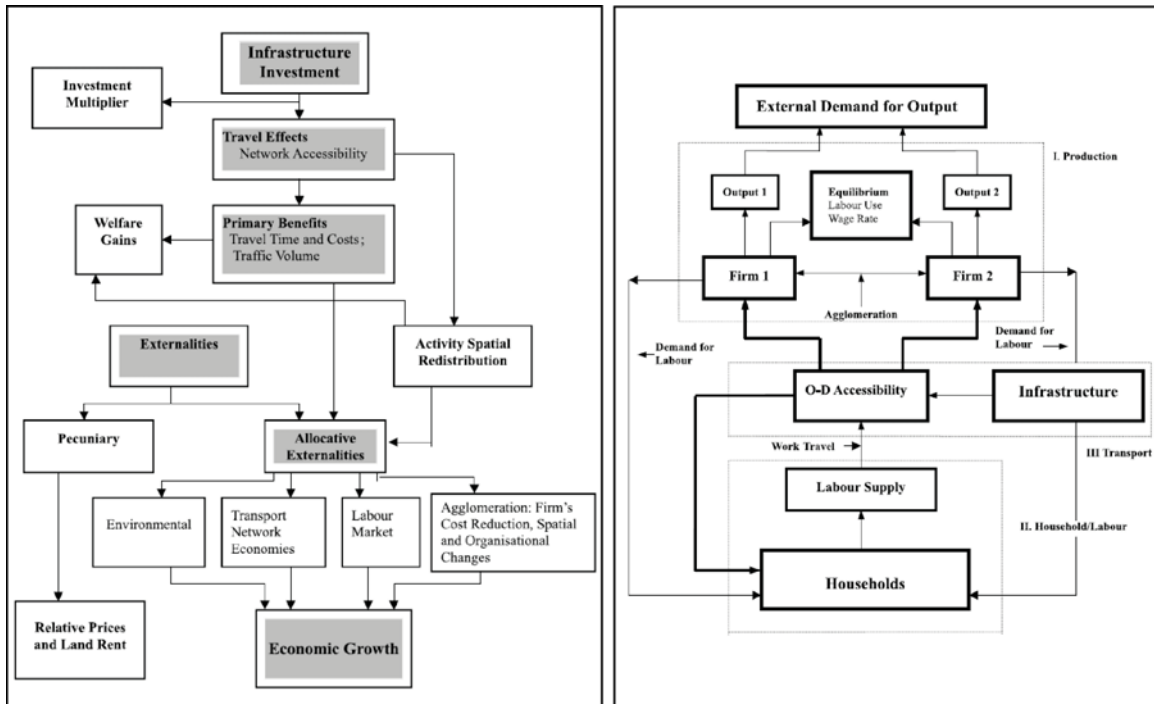


Figure 5.11 – Méthodes d'évaluation des retombées économiques de grands investissements dans les transports. Gauche : Modèle de l'impact des bénéfices économiques de l'investissement dans les infrastructures de transport. Droite : Modèle du système de relation entre le secteur de production, le secteur des transports, le marché de la main d'œuvre et les localisations des résidences. source (BANISTER et BERECHMAN, 2001, p.215 et 216)

5.2.1.2 Les modèles de potentiels d'interactions avec prise en compte du réseau d'échange

Depuis son transfert des sciences physiques aux sciences sociales, le modèle gravitaire s'est décliné en plusieurs modèles de potentiels d'interactions (c.f. section 1.2). En géographie et en économie, ces modèles statiques de potentiels d'interactions, plus sobres en hypothèses que les modèles d'évaluation par analyse de comparaison coût-bénéfices, sont utilisés pour modéliser et évaluer l'impact potentiel du développement d'un réseau de transport. Ces modèles mesurent le potentiel d'interactions d'un lieu avec les autres lieux du système considéré en fonction de la masse que ce lieu représente dans ce système et des distances relatives avec les autres lieux du système. La définition de la notion de masse évolue selon les modèles, mais prend en compte soit la taille démographique soit la puissance économique des lieux. L'un des avantages de ces modèles par rapport aux autres applications plus classiques dérivées du modèle gravitaire repose sur la notion de

distance relative. Celle-ci intègre à la fois la structure du réseau de transport et les temps de transport effectifs entre les lieux du système.

DE VRIES (1984) présente un modèle qui permet de mesurer l'évolution du potentiel d'interactions des villes européennes de 1200 à 1800. Ce modèle prend en compte l'évolution des moyens de transport et des vitesses de circulation sur toute la période considérée. BRETAGNOLLE (2009) propose plus tard une adaptation de ce modèle pour étendre la période considérée jusqu'en 1990. Pour les besoins de ce nouveau modèle, elle définit des distances d'interaction similaires à des "*distances euclidiennes corrigées par des informations portant sur la connaissance des principaux réseaux de l'échange aux dates considérées (maritimes, fluviaux, routiers, ferroviaires, aériens,...)*" (BRETAGNOLLE, 2009, p.121). Ce modèle, légèrement modifié par rapport à celui de J.de Vries, permet de pondérer et de remplacer des distances euclidiennes par des distances relatives qui varient au cours du temps selon l'évolution des réseaux de transport :

$$P_i = \frac{m_i}{d_{ii}} + \sum_j^N \frac{m_j}{k_{(ij,t)} \cdot d_{ij}}$$

où P_i est le potentiel d'interaction de la ville i , m_i la taille démographique de la ville i , d_{ij} la distance euclidienne entre les villes i et j et N le nombre de villes dans le système considéré. Le paramètre d_{ii} , est défini par l'auteur et détermine la contribution de la population d'une ville à son potentiel : il est égal à la distance au plus proche voisin divisée par deux. Le paramètre $k_{(ij,t)}$ permet de pondérer la distance entre chaque couple de villes en fonction de leur accessibilité réciproque à la date t . Ce paramètre n'a pas pu être dimensionné sur des données réelles car elles étaient impossibles à obtenir sur l'ensemble de la période considérée. Cependant il a pu être quantifié à partir d'hypothèses simples sur le type de dessertes de chaque ville et les vitesses de circulation en cours⁶. Cette quantification repose sur de nombreuses hypothèses difficilement vérifiables, mais elle offre une vision plus juste des conditions des interactions interurbaines que celle fondée sur la seule prise en compte des distances euclidiennes.

L'étude de l'évolution du potentiel d'interactions de villes européennes corrobore la théorie soutenue par les historiens du basculement tout au long de cette période du poids économique de l'Europe depuis le nord de l'Italie, vers la Belgique, puis les Pays-bas et enfin l'Angleterre (DE VRIES, 1984). Par ailleurs, (BRETAGNOLLE, 2009) a comparé l'évolution des potentiels ainsi obtenus avec l'évolution des potentiels calculés à partir des seules distances euclidiennes. La prise en compte des réseaux de transport ne bouleverse pas le classement du poids des villes mais renforce plutôt le poids de certaines villes, notamment de celles situées en périphérie.

6. A titre d'exemple, quand deux villes sont reliées par un réseau maritime, ce terme pondérateur prend la valeur 2, i.e. la distance euclidienne est divisée de moitié.

D'autres travaux se fondent sur le calcul de potentiels économiques pour quantifier les effets économiques et démographiques possibles de la construction de réseaux de transport performants (DUNDON-SMITH et GIBB, 1994 ; SPENCE et LINNEKER, 1994). Par exemple, GUTIERREZ (2001) utilise l'indicateur du potentiel économique (qu'il compare à deux autres indicateurs : un indicateur d'accessibilité journalière et un indicateur de temps moyen de transport) pour évaluer l'impact de la construction de la ligne de train à grande vitesse Madrid-Barcelone-Frontière Française. Dans ce modèle, le potentiel économique P_i du lieu i peut être interprété comme le volume d'activité économique auquel a accès ce lieu après que les coûts ou les temps de transport ont été pris en compte :

$$P_i = \sum_{j=1}^N \frac{M_j}{T_{ij}^\alpha}$$

Où P_i est le potentiel économique du lieu i , M_j la masse économique du lieu j (en nombre d'emplois, en valeur du produit intérieur brut de j , etc.), T_{ij} le temps ou le coût de transport effectif entre i et j , α le frein opéré par la distance. Les résultats obtenus par ce modèle, mais surtout leurs confrontations aux deux autres indicateurs de l'étude, mettent en évidence toute la difficulté de l'appréciation de l'impact d'une nouvelle infrastructure de transport. En effet ses résultats s'avèrent contradictoires selon l'indicateur évalué ou l'échelle géographique considérée : "*Certain statements could be true or false according to the geographic scale and the accessibility indicator selected. The new infrastructure will reduce accessibility inequalities among cities at the European scale, but will increase inequalities at the national scale*" (GUTIERREZ, 2001, p.241)

La modélisation des potentiels d'interactions permet de mesurer par un indicateur systématique relativement simple à calculer le poids d'un élément dans le système à un instant donné tout en tenant compte de l'état des réseaux d'échange entre les éléments. Cet indicateur paraît donc très approprié pour évaluer la place relative d'une ville dans le système en fonction de la structure du réseau d'échange. Cependant, un indicateur ne permet pas de modéliser un processus et *a fortiori* ne permet pas définir un mécanisme dynamique. Les travaux présentés dans la section suivante intègrent justement l'indicateur du potentiel d'interactions dans des modèles de croissance urbaine.

5.2.1.3 Les modèles gravitaires de croissance urbaine avec potentiels d'interactions

Dans la section 2.1.4, nous avons présenté des modèles capables d'engendrer une diversité de tailles de villes à partir de processus spatiaux d'interaction interurbaine (WILSON, 1969 ; FAVARO, 2007 ; WEIDLICH et HAAG, 1988 ; WHITE, 1978 ; ALLEN et SANGLIER, 1979 ; SANDERS et al., 1997). Le principe de ces modèles est de concevoir le processus de croissance démographique de chaque ville du système comme le résultat d'un processus

d'interactions spatiales. Les interactions spatiales sont interprétées comme les mécanismes d'une compétition, moteur de la croissance, entre les villes pour attirer les activités économiques et accumuler population et richesse. Des différentiels d'attractivité sont à l'origine d'une asymétrie dans les interactions interurbaines qui produisent des différentiels de croissance et donc à terme une différenciation hiérarchique. Nous avons ainsi vu que le modèle de WILSON (1969), adapté à la dynamique des systèmes de villes par FAVARO (2007, chp.3), utilise des formules gravitaires d'interactions spatiales pour simuler des différentiels de croissance urbaine qui engendrent progressivement une hiérarchisation du système de villes. En effet, le modèle simule l'intensité des flux migratoires interurbains en fonction de l'attractivité relative de chaque ville (qui dépend de son profil économique mais aussi de la distance la séparant des autres villes). Ce modèle présente cependant quelques défauts qui justifient que nous ne reprenons pas telles quelles les équations de croissance démographique pour le modèle SimpopNet ⁷.

Ces modèles de croissance permettent donc de simuler de façon dynamique l'évolution de la population de chaque ville du système comme le reflet d'interactions interurbaines qui suivent des lois gravitaires. Toutefois ils ne prennent en compte l'effet de la situation relative de chaque ville dans le système qu'en fonction des distances euclidiennes séparant les villes deux à deux. Il serait intéressant d'incorporer dans un modèle gravitaire de croissance la notion de distance relative en fonction de l'état du réseau d'échange à chaque instant. Cela permettrait ainsi de combiner l'approche statique des calculs de potentiels d'interactions avec l'approche dynamique des modèles gravitaires de croissance urbaine. C'est ce que nous proposons de faire dans le modèle SimpopNet.

5.2.2 Les modélisations de l'effet de l'organisation spatiale des systèmes de villes sur la croissance des réseaux de transport

Dans la section précédente nous avons vu que les modèles de croissance urbaine qui tiennent compte de la structure des réseaux d'échanges pour expliquer les différentiels de croissance sont rares. Par ailleurs, la modélisation de la croissance d'un réseau sur un territoire est un problème qui a suscité de nombreux travaux de recherche, surtout depuis l'avènement de la recherche sur les réseaux complexes.

7. Dans ce modèle la hiérarchisation simulée est d'autant plus intense que la contrainte de la distance sur les échanges est importante, ce qui peut paraître contre-intuitif : plus les échanges interurbains sont difficiles et plus une grosse proportion de la population du système se concentre dans une unique ville (FAVARO, 2007).

5.2.2.1 L'évolution des approches de modélisation de la croissance de réseaux de transport

XIE et LEVINSON (2009) ont proposé un état de l'art de la modélisation de la croissance des réseaux de transports. Ils présentent ainsi clairement les différentes approches que cette problématique a suscité et qui varient selon les champs d'applications (empiriques ou théoriques) mais aussi selon les méthodes de modélisation (études statistiques, systèmes dynamiques, individus-centrés, théorie des graphes, etc.). Cette diversité des approches et courants de modélisation de la croissance des réseaux de transports est résumée dans un tableau étiquetant les modèles que les auteurs considèrent comme les plus représentatifs de chaque approche de modélisation. Les travaux présentés dans cet état de l'art suivent cinq grands courants :

1. Entre les années 60 et 70, les modèles (essentiellement proposés par des géographes) simulaient la croissance des réseaux comme des transformations topologiques. Mais la nécessaire simplicité des réseaux considérés et le manque de connaissance des mécanismes d'évolution des réseaux rendaient ces modèles peu représentatifs. XIE et LEVINSON (2009, p.294) citent HAGGETT et CHORLEY (1969) qui, s'appuyant sur les travaux de leurs contemporains, déclaraient qu'une : "*general theory of network growth lies in future research*".
2. Depuis les années 70, les modèles prédictifs de demande de transport fournissent aux décideurs publics et aux économistes des outils d'évaluation et de prédiction des flux de trafic. Fondés sur des calculs d'optimisation de gestion des flux de transport, ils permettent ainsi de déterminer les évolutions ou les changements optimaux d'un réseau de transport en fonction de leur répercussions sur les flux.
3. Plus récemment, grâce à la production en masse de données très complètes mais aussi au développement des capacités de calcul, des travaux fondés sur des analyses statistiques à grandes échelles permettent de faire le lien entre les changements d'offre de transport (présence/absence d'infrastructure, fréquences ou capacités des services de transport, etc.) et les répercussions sur le territoire (modifications des caractéristiques démographiques et socio-économiques des zones géographiques concernées, modifications des conditions du trafic, etc.)
4. L'économie des transports s'est aussi intéressée aux répercussions économiques de la croissance de réseaux de transport. Les travaux sont alors centrés sur des problématiques comme les capacités d'investissement, les coûts de fonctionnement, la rentabilité, mais aussi l'effet réseau, etc. (c.f. section 5.1.4.2).
5. A partir des années 90, l'approche système complexe appliquée à la théorie des graphes et à la science émergente des réseaux apporte de nouvelles perspectives

de modélisation de croissance de réseaux. L'évolution des réseaux est alors souvent interprétée comme un processus spontané et est modélisée de façon dynamique. L'approche individu-centré et la simulation à base d'agents sont ainsi de plus en plus utilisées pour des processus de croissance de réseaux. (GASTNER et NEWMAN, 2006 ; BARTHÉLEMY et FLAMMINI, 2006)

Nous ne voulons pas (du moins pour le moment) inscrire le modèle SimpopNet dans le réalisme d'une situation aux données empiriques détaillées, ni lui assigner un rôle prédictif. Nous cherchons plutôt à trouver une forme de modélisation simplifiée candidate à l'explication d'un processus : celui de la distribution de la croissance d'un réseau dans l'espace d'un système de villes hiérarchisé. Dans ce contexte, les travaux sur l'application de la théorie des graphes à la croissance d'un réseau sont très intéressants. Parmi tous les modèles de croissance de graphes, une petite portion incorpore de façon explicite la notion d'espace et de distance. BARTHELEMY (2010, p.43-59) y a consacré un état de l'art. Nous présentons ici deux formes de modélisation qui nous paraissent particulièrement pertinentes pour notre problème.

5.2.2.2 Les deux modèles de croissance de réseaux de Gastner et Newman (2006)

GASTNER et NEWMAN (2006) se sont intéressés à la modélisation des processus de croissance d'un réseau. Ils centrent leur réflexion sur la notion d'efficacité d'un réseau qui s'appuie sur deux indicateurs clés :

- La longueur totale du réseau (aussi résumée par la longueur moyenne des liens). Cet indicateur représente le coût de construction et de maintien de l'infrastructure, et ne doit pas être trop grand.
- l'indice de détour Q_{ij} entre deux nœuds i et j . En effet, un réseau est jugé efficace s'il optimise les connexions entre tous les nœuds du réseau deux à deux. Dans ce cas, la longueur totale du plus court chemin reliant deux nœuds doit être la plus proche possible de leur distance euclidienne. Cette efficacité est mesurée par l'indice de détour Q_{ij} entre les deux nœuds i et j qui sont séparés par une distance euclidienne De_{ij} et une longueur du plus court chemin par le réseau de Dr_{ij} (longueur cumulée des liens empruntés) : $Q_{ij} = Dr_{ij}/De_{ij}$.

Ces deux critères d'efficacité sont opposés. En effet, alors que l'arbre de recouvrement minimum est le réseau le plus efficace selon le critère de longueur totale du réseau (par définition), il pêche totalement en terme d'efficacité selon le critère de l'indice de détour. Par ailleurs le réseau en étoile à partir d'un nœud central répond parfaitement au critère

de l'indicateur de détour mais offre un très mauvais résultat selon l'indicateur de longueur totale de réseau. En s'appuyant sur la comparaison de quatre réseaux (le réseau d'égouts de Bellingham, deux réseaux de pipeline de gaz en Australie et en Illinois et le réseau ferré de la ville de Boston), les auteurs observent que beaucoup de réseaux réels sont de très bons compromis entre ces deux types extrêmes de réseau et qu'ils se rapprochent même souvent d'une distribution optimale au regard de ces deux critères.

GASTNER et NEWMAN (2006) proposent ainsi deux modèles de croissance de réseaux pour expliquer ce processus d'optimisation. Ils supposent pour cela que les structures de réseaux observées ne peuvent être engendrées que par des processus d'optimisation locaux. En effet, les réseaux réels (tels que les réseaux d'infrastructure de transport ou de distribution) sont généralement amenés à évoluer au cours du temps par extension ou par densification. Dans ces cas, le développement du réseau ne peut plus résulter d'une optimisation globale mais pourrait en revanche suivre un processus d'optimisation locale. Les auteurs postulent alors que ces réseaux évolutifs présentent souvent un nœud central. Il peut s'agir d'une source de distribution ou d'une gare centrale dans le cas de réseau ferré par exemple. Pour un réseau à N nœuds avec un nœud central (nœud 0), l'indice de détour global q peut s'écrire :

$$q = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{Dr_{i0}}{De_{i0}}$$

Le premier modèle simule la construction d'un réseau à partir d'une distribution aléatoire des nœuds dans un espace bidimensionnel (le nœud 0 est désigné comme nœud source). Le réseau est peu à peu constitué en ajoutant un à un des liens entre des nœuds qui sont déjà connectés au réseau et des nœuds qui ne le sont pas. Chaque lien est choisi car il minimise la fonction d'optimisation ε_{ij} , où α est un paramètre contrôlant l'importance du facteur de détour :

$$\varepsilon_{ij} = De_{ij} + \alpha \frac{De_{ij} + Dr_{j0}}{De_{i0}}$$

La figure 5.12 montre l'évolution de l'indice de détour global (*route factor* q) et de la longueur moyenne des liens du réseau (*edge length* l) en fonction de α : quand α augmente, l'indice de détour global diminue rapidement alors que la longueur moyenne des liens croît lentement. Ce résultat suggère qu'avec ce mécanisme de croissance, il est possible de produire des réseaux à faible coût tout en conservant une bonne efficacité. Cependant ce modèle présente le grand inconvénient de ne pas forcément produire une seule composante connexe : certains nœuds ne sont jamais reliés au réseau. Les auteurs proposent donc un deuxième modèle, qui lève la contrainte de l'effet détour et donne la préférence aux chemins les plus courts. Dans la dynamique de croissance du réseau de ce deuxième modèle, chaque nouveau lien ajouté est choisi de manière à minimiser la fonction d'optimisation ε'_{ij} :

$$\varepsilon'_{ij} = De_{ij} + \beta Dr_{j0}$$

Ce deuxième modèle produit des réseaux proches de ceux générés par le premier modèle proposé, c'est à dire avec une bonne efficacité globale, même selon la contrainte de facteur de détour alors que celle-ci n'est pas précisément spécifiée dans le modèle. Simulé sur un semis initial de points représentatifs de la répartition spatiale des stations du réseau ferré de Boston, le réseau généré est très proche du réseau réel (avec $\beta = 0,4$). Ce deuxième modèle se soumet donc aux deux contraintes d'organisation de réseau par *auto-organisation*, c'est-à-dire sans pour autant qu'elles soient spécifiées dans le modèle.

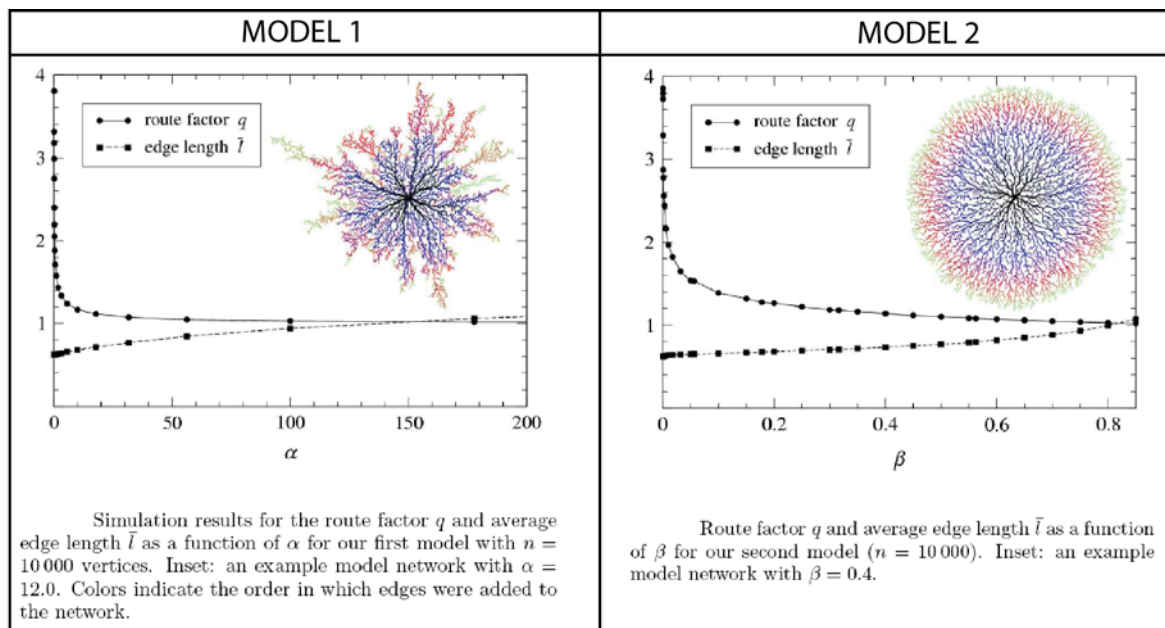


Figure 5.12 – Résultats de simulation des modèles de croissance de réseau avec contrainte de GASTNER et NEWMAN (2006) (Model1 : ε_{ij} et Model2 : ε'_{ij}) sur un semis de point généré de façon aléatoire, source (GASTNER et NEWMAN, 2006, p.3-4)

Bien que les mécanismes proposés soient très efficaces par rapport aux deux contraintes initialement spécifiées et qu'ils donnent une bonne représentation de certains types de réseaux, ils ne semblent pas suffisamment bien adaptés à la représentation de réseaux d'échange au sein d'un système de villes. D'abord, les réseaux obtenus par ces modèles sont des arbres, ce qui est une simplification par rapport aux réseaux interurbains physiques (réseau ferré, autoroute, etc.) qui présentent souvent des boucles. Cette caractéristique des réseaux simulés est due au fait que les mécanismes proposés s'appuient sur le concept de nœud central. Si l'on considère un système de villes comme un réseau, les villes formant les nœuds et les réseaux physiques de communication, les liens, il est rare de pouvoir spécifier un nœud, i.e. une ville, comme nœud d'origine du réseau. Cela est parfois le cas de systèmes urbains intra-nationaux hautement centralisés, mais ils ne sont pas courants. En outre, ces mécanismes déterministes n'ont pas d'ancrage temporel. Ce sont des mécanismes qui permettent de générer sous contraintes des graphes aux caractéristiques spécifiques mais ils ne permettent pas de reproduire un processus de croissance qui se déroule dans le

temps. Ce sont des mécanismes d'optimisation plutôt que des mécanismes descriptifs, proches des processus observés. Par ailleurs, les règles de croissance proposées dépendent de la structure du réseau existant, mais ne tiennent pas compte des propriétés des nœuds. Ainsi, si les modèles exposés s'avèrent pertinents pour la génération de graphes *efficaces* en termes de longueur moyenne des liens et d'indice de détour, les mécanismes proposés ne reflètent pas suffisamment bien les processus de croissance de réseaux à l'échelle d'un système de villes.

5.2.2.3 Les modèles de croissance de réseaux par attachement préférentiel avec dimension spatiale

Nous avons déjà rencontré dans la section 2.1.2 le mécanisme de croissance de réseau par attachement préférentiel proposé par BARABASI et ALBERT (1999). Par ce mécanisme, un nouveau nœud se lie préférentiellement avec un nœud déjà bien connecté au réseau. Ce mécanisme de croissance de réseau fait émerger une hiérarchisation des nœuds suivant leur degré de connectivité, telle que la distribution des degrés de connectivité dans le réseau forme une loi d'échelle de type loi puissance. Cette caractéristique est représentative des nombreux grands réseaux comme le réseau de liens entre sites internet, les réseaux sociaux ou encore les réseaux de transport.

De nombreuses variantes de ce modèle ont été proposées pour reproduire certaines spécificités. Parmi celles-ci, certaines prennent en compte la notion d'espace (BARTHELEMY, 2010). Dans ces modèles à dimension spatiale, un nouveau nœud est préférentiellement connecté à un nœud déjà très bien connecté, à moins que celui-ci ne soit trop éloigné et alors le nœud est préférentiellement lié à un nœud moins bien connecté au réseau mais plus proche. Dans ces cas, le processus global de croissance est similaire, mais la probabilité de connexion d'un nouveau nœud n à un nœud i dépend aussi d'une fonction F de la distance euclidienne De_{ni} entre n et i :

$$P_{n \rightarrow i} = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \cdot F(De_{ni})$$

Ce mécanisme de croissance de réseau par attachement préférentiel permet donc de simuler un processus de développement du réseau en fonction des caractéristiques propres à chaque nœud du réseau. Cette particularité est spécialement intéressante pour la simulation du processus de coévolution. Cependant il est nécessaire d'y ajouter une spécification pour rendre le mécanisme de coévolution plus représentatif des faits stylisés décrits dans la section 5.1.4. Dans le modèle d'attachement préférentiel, une bonne connectivité d'un nœud appelle une meilleure connectivité de ce nœud. Nous souhaitons donc ajouter une étape intermédiaire : une grande taille de ville appelle sa bonne insertion dans le réseau de transport qui en retour a un effet moteur sur la taille de cette même ville. Si cette

boucle peut être considérée comme incluse dans le processus d'attachement préférentiel, il est nécessaire de l'expliciter dans la modélisation micro-géographique du processus de coévolution pour la mettre en évidence.

Les deux formes de modélisation de croissance de réseau présentées dans cette section forment le point de départ de notre modélisation du processus de croissance du réseau en fonction de l'organisation spatiale d'un système de villes. Les modèles de GASTNER et NEWMAN (2006) permettent de prendre en compte la notion d'efficacité de réseau pour optimiser son développement et le modèle de croissance par attachement préférentiel permet de prendre en compte les caractéristiques des nœuds (comme leur taille par exemple) dans l'évolution du réseau.

5.2.3 Des modèles de coévolution entre les réseaux de transport et les systèmes urbains

Nous avons détaillé dans les sections précédentes des solutions distinctes pour la modélisation des deux effets de la boucle de rétroaction positive de coévolution (effet du réseau de transport sur la croissance urbaine et réciproquement). Il existe toutefois des modèles qui intègrent la boucle dans sa totalité et modélisent les deux effets au sein du même modèle.

5.2.3.1 Les modèles LUTI

Les modèles LUTI (*Land Use - Transportation Interaction models*) modélisent les évolutions d'occupation du sol en fonction de l'état et des modifications des réseaux de transports. Ils reposent ainsi sur les interactions entre les localisations des activités ou des acteurs et la demande en transport qui en résulte. Il existe un grand nombre de modèles LUTI qui peuvent prendre des formes très variées (SIMONS, ECHENIQUE et BATES, 1999 ; TIMMERMANS, 2003 ; LEFEVRE, 2007). LEFEVRE (2007) en donne une typologie (c.f. figure 5.13). Les modèles LUTI se divisent ainsi entre les modèles d'optimisation (dont la finalité est d'optimiser les configurations urbaines en fonction d'un objectif de planification) et les modèles de prévision (qui ont pour objectif de prévoir les effets des politiques de transport et d'urbanisme sur la structure urbaine). Les modèles de prévision se répartissent entre les modèles statiques et les modèles quasi-dynamiques. Les modèles statiques s'appliquent à un moment donné dans l'espace et ne permettent pas "*d'envisager de réelle boucle interactive entre transport et urbanisme*" (LEFEVRE, 2007, p.296). Les modèles quasi-dynamiques fonctionnent quant à eux sur plusieurs périodes de temps. Parmi ces modèles, les modèles basés sur l'entropie se fondent sur les travaux de WILSON (1967). Dans ces modèles, la distribution spatiale des résidences et des emplois est

fonction de l'attractivité, calculée selon le nombre d'acteurs dans la zone et des coûts de déplacements associés à chaque zone (modèle gravitaire). Les modèles spatio-économiques s'appuient sur une base micro-économique pour simuler les dynamiques des marchés fonciers. Ils s'attachent à représenter les mécanismes économiques théoriques du marché afin d'aboutir à l'équilibre entre l'offre et la demande à la fois dans l'usage des sols et dans les transports (LEFEVRE, 2007, p.283). Les modèles basés sur l'activité sont des modèles de micro-simulation (simulation des comportements de chaque individu) qui simulent les processus de changement qui affectent les activités et les espaces qu'elles occupent. Ils sont caractérisés par la recherche d'une grande représentativité des comportements de localisation et de déplacement. Cette représentativité exige une grande qualité et quantité de données et résulte en des modèles lourds à implémenter, à simuler et à calibrer.

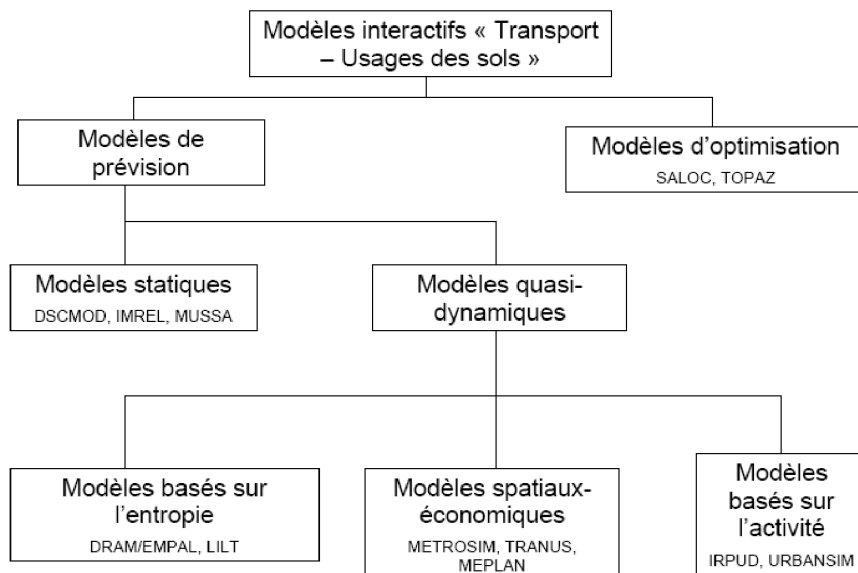


Figure 5.13 – Typologie des modèles d'interaction transport - usage du sol (modèle LUTI), source (LEFEVRE, 2007, p.277)

Les modèles d'interactions entre les réseaux de transport et l'occupation des sols représentent donc un grand pan de la recherche en géographie et en économie urbaine. Les modèles LUTI s'attachent à modéliser des processus d'organisation spatiale de l'usage du sol à l'échelle intra-urbaine. Ils sont souvent employés sur des cas concrets avec des systèmes d'information géographique et des outils de simulation de type automates cellulaires. En effet, ils reposent sur la simulation de processus suffisamment détaillés pour garantir au moins un bon réalisme suivant la théorie économique classique sinon un bon réalisme des comportements individuels. Pour ces deux raisons, ils ne sont pas adaptés à la modélisation de notre problématique. L'enjeu de modélisation du modèle SimpopNet est la vraisemblance des processus et des organisations à l'échelle macro-géographique

du système de villes et non pas à l'échelle intra-urbaine. Le raffinement des processus à l'échelle intra-urbaine pour chaque ville du système et le couplage de ces modèles pour engendrer une dynamique de système de villes représente un tout autre projet bien ambitieux. Les travaux de thèse de LOUAIL (2010) en sont une première tentative pionnière. Par ailleurs le modèle fondé sur le principe de l'entropie de WILSON (1967) a bien été adapté à l'échelle du système de ville par FAVARO (2007, chp.3) (c.f. section 5.2.1.3), cependant ce modèle ne tient pas compte des réseaux de transports.

5.2.3.2 Un modèle individus-centré de la coévolution système de villes et réseau de communication

BLUMENFELD-LIEBERTHAL et PORTUGALI (2010) ont proposé un modèle de simulation conçu pour étudier l'évolution et la dynamique d'un système de villes en fonction du réseau d'interactions interurbaines. Le modèle s'appuie sur le postulat que les grands centres d'affaire attirent plus de travailleurs et donc de navetteurs (des personnes qui n'habitent pas la ville dans laquelle se situe le centre d'affaire, mais qui font le trajet de façon journalière pour venir y travailler) que les plus petits centres d'affaire. Le modèle simule un réseau urbain de navettage : les nœuds du réseau représentent les centres d'affaires et les liens le taux de déplacements journaliers. Le système simulé est un système urbain fermé, c'est-à-dire que la population totale du système mais aussi le nombre de centres d'affaire considérés sont constants. À l'initialisation de la simulation, un nombre N de centres d'affaires se voit attribuer une population initiale comprise entre 1 et 100 habitants. À chaque itération un centre d'affaire i est pris au hasard, et son pouvoir d'interaction PV_{ij} avec les autres centres d'affaire du système est compilé en fonction de sa taille P_i , de celle des autres (i.e. $P_j, \forall j, j \neq i, j \in [0, N]$) et de la distance les séparant D_{ij} telle que : $PV_{ij} = P_i \cdot P_j / D_{ij}$. Si la plus grande valeur des PV_{ij} , i.e. $PV_{max_{ij}}$, dépasse un seuil prédéfini PV_0 , alors un lien entre i et j est créé. Quand un lien est créé, un transfert de population entre les deux centres d'affaire nouvellement reliés est réalisé. La taille de la population transférée est déterminée par un pourcentage prédéfini β de la population du plus petit centre d'affaire vers le plus grand centre d'affaire. BLUMENFELD-LIEBERTHAL et PORTUGALI (2010) étudient ainsi les distributions de tailles de centres d'affaire qui résultent de ce processus d'interactions. Ils comparent les formes de hiérarchisation du système obtenues en fonction des deux paramètres clés du modèle, le seuil PV_0 et le pourcentage β de transfert d'un centre à l'autre.

Ce modèle est un des premiers à étudier la hiérarchisation des systèmes urbains à partir de la coévolution entre l'organisation du système urbain et son réseau d'interaction. Pourtant nous pensons qu'il n'est pas adapté à l'étude du processus de hiérarchisation. D'abord ce modèle simule l'évolution d'un système fermé au cours de laquelle chaque itération ne résulte qu'en une redistribution de la population. Nous soutenons qu'un vé-

ritable modèle de *croissance* d'un système de villes serait plus efficace pour capturer le processus de hiérarchisation. Ensuite, comme le processus de hiérarchisation historiquement observé est soutenu par l'évolution des vitesses de transport et de communication (c.f. section 5.1.3), il est important de la prendre en compte dans la modélisation des échanges interurbains. Enfin, le modèle de BLUMENFELD-LIEBERTHAL et PORTUGALI (2010) ne tient que superficiellement compte de la place d'un centre d'affaire au sein du système pour expliquer sa taille. D'autres mécanismes sont envisageables.

Inspirés et forts de cette large modélographie, nous proposons avec le modèle Simpop-Net une nouvelle forme de modélisation de la coévolution entre les réseaux d'échange et le système de villes.

5.3 Le modèle SimpopNet

Nous entamons dans cette partie la description du modèle SimpopNet. Cette description se veut la plus complète possible et suit dans les grandes lignes le protocole de description ODD, *Overview, Design concept, Details* (GRIMM, BERGER, BASTIANSEN et al., 2006 ; GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al., 2010)(dont la dénomination des éléments est rappelée entre parenthèses dans les titres des paragraphes). SimpoNet est encore en cours de développement, le modèle décrit dans cette section peut donc être considéré comme un prototype. Nous présenterons ici les principales avancées réalisées.

5.3.1 Les enjeux de simulation (*Purpose*)

Le modèle SimpopNet est conçu pour tester par la simulation les hypothèses relatives aux liens dans coévolution entre un système de transport et un système de villes. L'enjeu du modèle est de simuler les hypothèses relatives à la boucle de rétro-action entre taille et accessibilité d'une ville au niveau micro-géographique et d'observer les conséquences de cette simulation au niveau géographique supérieur (c.f. figure 5.10). Du côté du réseau de transport interurbain, il s'agit d'observer une diffusion hiérarchique d'innovations sur le territoire et un court-circuitage progressif des petites villes *étapes* (faits stylisés 1 à 4 de la section 5.1.3). Du côté du système de villes, il est attendu d'observer une relation statistique entre la taille d'une ville et son accessibilité et une hiérarchisation progressive du système de peuplement (fait stylisé 5 de la section 5.1.3).

Différents mécanismes alternatifs, représentatifs d'hypothèses concurrentes sur la coévolution, peuvent donc être envisagés, simulés et confrontés grâce au modèle. Au moins trois hypothèses sur les relations micro-géographiques entre accessibilité et taille urbaine sont à tester par la simulation (c.f. figure 5.14). L'hypothèse h1 est celle de l'existence d'une boucle de rétroaction positive entre taille et accessibilité urbaine (i.e. hypothèse de la coévolution). L'hypothèse h2 correspond au seul effet de la taille urbaine sur son accessibilité avec un effet de rétroaction positive de la taille sur elle-même (comme nous l'avons suggéré en section 5.1.4.3). Nous ne modélisons cependant pas cette hypothèse ici. En effet, l'hypothèse h2 engendrerait par définition une hiérarchisation du système, mais d'autres caractéristiques, comme la temporalité de cette hiérarchisation ou des indices de corrélations positifs mais trop forts entre les taux de croissance et les tailles urbaines ne seraient pas représentatives des données observées. Il serait cependant nécessaire de proposer et tester un tel mécanisme pour l'écarter définitivement. L'hypothèse h3 est celle du rejet de l'effet de l'accessibilité sur la taille, c'est-à-dire du rejet de la boucle complète de rétroaction positive entre taille et accessibilité.

La plausibilité des hypothèses est évaluée en fonction des caractéristiques macro-géographique et des formes d'évolution du système de villes et du réseau de transport

qu'elles engendrent. La simulation de la boucle complète de coévolution au niveau micro-géographique (hypothèse h1) engendre-t-elle des structures macroscopiques plus caractéristiques du système de peuplement que les autres hypothèses envisagées ?

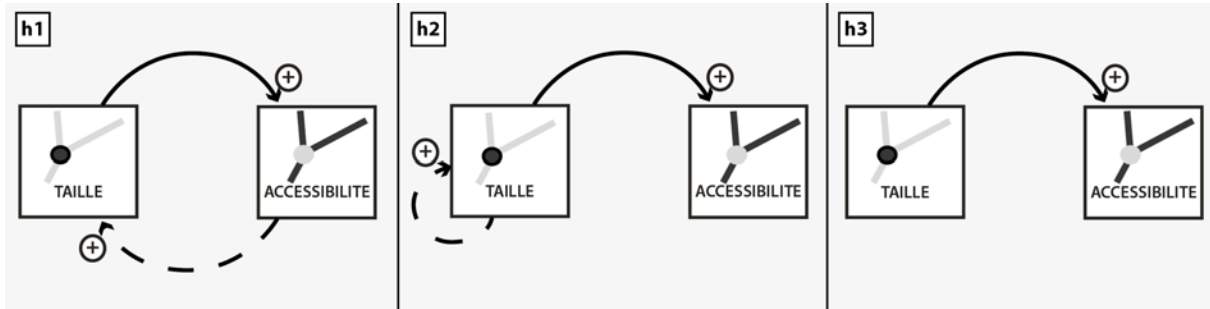


Figure 5.14 – Trois hypothèses à tester par la simulation sur les relations entre taille et accessibilité urbaine à l'échelle micro-géographique

5.3.2 Vue d'ensemble des entités et des dynamiques simulées (*Entities, state variable, and scale*)

Le modèle SimpopNet simule l'évolution sur 200 ans (entre 1800 et 2000) de deux systèmes en interaction, le système de villes et le réseau de transport interurbain. Chaque pas de simulation du modèle représente 1 an, aussi le modèle est simulé sur 200 pas. SimpopNet emploie le formalisme de la théorie des graphes et modélise deux types d'entités : des nœuds et des liens (arêtes non-orientées).

Les nœuds du graphe représentent les villes. Les villes sont caractérisées par leur localisation euclidienne dans l'espace mais aussi par leur localisation relative dans le graphe. Elles ont chacune une taille démographique P_t^i qui évolue dans le temps.

Les liens du graphe représentent des portions de voies du réseau de transport qui relient physiquement les villes entre elles. Il existe plusieurs types de lien en fonction des vitesses de circulation qu'ils supportent. Les liens dits anciens sont présents dès l'initialisation de la simulation et sont caractérisés par une vitesse de circulation faible. Les liens innovants sont créés par la dynamique du modèle et sont caractérisés par des vitesses de circulation plus rapides. La vitesse soutenue par chaque lien dépend du pas de simulation au cours duquel le lien a été créé. Nous avons choisi de dimensionner l'évolution des vitesses de circulation simulée à partir de l'évolution des vitesses de circulation observées au cours de la période 1800 - 2000 (c.f. figure 5.15). Nous définissons ainsi 4 vitesses moyennes de circulation ($speed_0$, $speed_1$, $speed_2$, et $speed_3$) qui correspondent à 4 niveaux hiérarchiques distincts du réseau de transport (c.f. tableau 5.2). Pour le déroulement du modèle SimpopNet, la valeur absolue de ces vitesses n'a pas d'importance et il suffit de raisonner avec des valeurs relatives. Les différences relatives de vitesse entre chaque niveau hiérarchique du

réseau de transport sont conformes aux différences observées. Comme différentes vitesses de circulation sont prises en compte, les distances relatives entre les villes selon le réseau de connexions interurbain sont comptabilisées en termes de distance-temps : T_{ij} , le temps nécessaire pour rejoindre les deux nœuds i et j en parcourant le réseau.

Chaque ensemble de liens caractérisé par une même vitesse de circulation forme un niveau hiérarchique du réseau de transport dont le sous-graphe (graphe formé par ces seuls liens et les nœuds qu'ils relient) est planaire. En effet lorsque deux liens de même vitesse se croisent, un nouveau nœud particulier est généré à la localisation de cette intersection. Ce nœud particulier ne représente pas une nouvelle ville, mais bien une simple intersection, un carrefour.

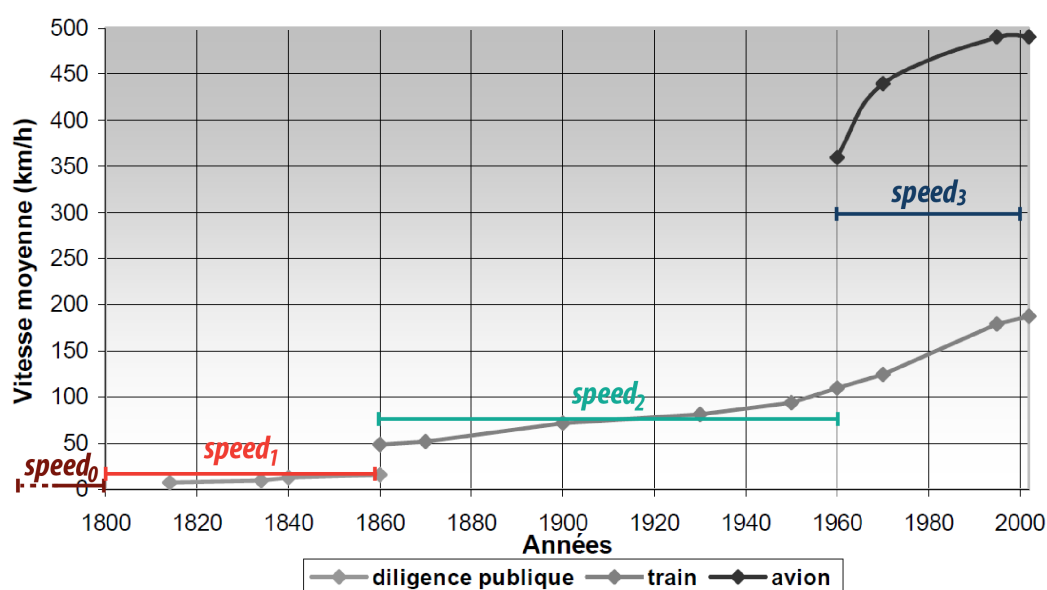


Figure 5.15 – Évolution de la vitesse moyenne des grandes liaisons régulières entre Paris et les principales villes de province de 1800 et 2000 et détermination des vitesses simulées, d'après (BRETAGNOLLE, 2009, p.118)

La dynamique du modèle SimpopNet fait évoluer d'un côté le réseau de transport interurbain et de l'autre le système de villes. Les mécanismes de croissance du réseau sont conçus pour représenter les dynamiques de croissance de réseaux mises en évidence par les études empiriques (c.f. section 5.1.4). Ainsi, lorsqu'une innovation dans les transports se diffuse dans le système de villes, plus une ville est grande et plus forte est sa probabilité de capter l'innovation, c'est-à-dire d'être connectée à un réseau de transport par des liens aux caractéristiques innovantes. Le réseau de transport interurbain évolue par ajout de liens. Durant une simulation, des innovations dans le réseau se diffusent sur le territoire grâce à l'apparition successive de nouveaux liens innovants sur lesquels les temps de transport sont réduits. Deux mécanismes alternatifs de croissance de réseau sont proposés. Le premier mécanisme simule une croissance endogène du réseau selon un mécanisme stochastique :

Période de construction du tronçon	Vitesse moyenne réelle d'après Bre-tagnoile (2009)	vitesse innovante en cours v_{inno}^t	Vitesse relative par rapport à $speed_0$
Avant 1800	$4km.h^{-1}$ (marche)	$speed_0$	$speed_0$
1800 - 1860	$20km.h^{-1}$ (premiers trains)	$speed_1$	$5.speed_0$
1860 - 1960	$80km.h^{-1}$ (deuxième génération de trains)	$speed_2$	$20.speed_0$
1960 - 2000	$300km.h^{-1}$ (TGV et avions)	$speed_3$	$75.speed_0$

Tableau 5.2 – Les différences de vitesses de chaque niveau hiérarchique du réseau de transport modélisé en fonction de l'évolution réelle des vitesses de circulation

la probabilité qu'un tronçon innovant soit construit entre deux villes i et j dépend à la fois du potentiel d'interactions W_t^{ij} à l'instant t entre ces deux villes (calculé suivant une loi gravitaire) et de l'efficacité du réseau de transport déjà existant. Par ailleurs, le deuxième mécanisme (alternatif au premier) permet de *scénariser* la croissance du réseau : les pas de simulation durant lesquels des liens vont être ajoutés et les nœuds qu'ils vont connecter sont pré-déterminés. Ce mécanisme d'évolution du réseau *entièrement scénarisée* permet de comparer les mécanismes de croissance urbaine à *croissance de réseau égale*.

Les mécanismes de croissance de systèmes de villes font croître chaque ville en fonction de l'hypothèse retenue. Ainsi plusieurs modèles de croissance urbaine concurrents sont nécessaires. Parmi les trois hypothèses possibles énumérées (c.f. figure 5.14), nous n'en modélisons que deux (c.f. section 5.3.1) :

- h1 : le taux de croissance de chaque ville dépend de la situation relative de la ville dans le réseau d'interaction du système de villes. Dans ce modèle de croissance, l'évolution démographique de chaque ville dépend de son pouvoir d'interaction avec toutes les autres en fonction de leur taille et de leur accessibilité dans le réseau.
- h3 : le taux de croissance de chaque ville ne dépend ni de la taille de la ville ni de sa position dans le réseau. Nous avons choisi de simuler le modèle de Gibrat (GIBRAT, 1931) qui se plie à ces contraintes (c.f. section 2.1.2.2). Ce deuxième modèle de croissance sert d'étalon de référence et permet par comparaison de mesurer l'influence des interactions entre les villes sur l'évolution global du système de villes.

5.3.3 Les dynamiques de SimpopNet (*Processes overview and scheduling*)

Le modèle SimpopNet présente quatre mécanismes : deux mécanismes alternatifs de croissance du réseau et deux mécanismes alternatifs de croissance des villes (c.f. figure 5.16).

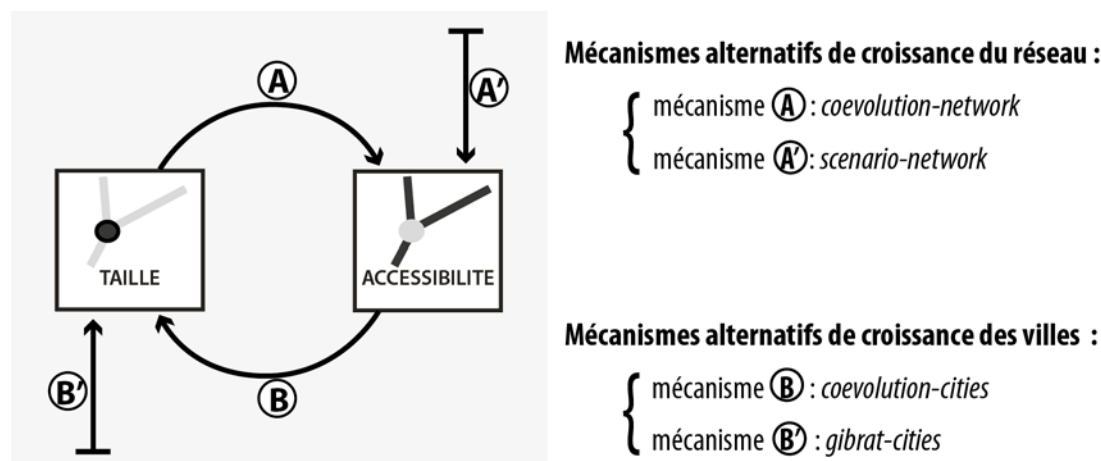


Figure 5.16 – Les mécanismes du modèle SimpopNet

5.3.3.1 Croissance du réseau de transport par coévolution : le mécanisme *coevolution-network*

Ce mécanisme simule l'effet positif de la taille urbaine sur son accessibilité (fait stylisé 1 de la section 5.1.4.4). L'évolution du réseau de connexion interurbain est simulé par ajout de liens. La sélection de la localisation d'un nouveau lien dépend à la fois de l'organisation spatiale du système de villes et du réseau déjà existant. Le mécanisme de création de nouveau lien se déroule en 4 étapes (détaillées ci-dessous) : la sélection des deux nœuds à relier ; l'évaluation de l'efficacité de la connexion déjà existante entre ces deux nœuds ; le test de création de ce lien ; et la gestion des intersections. Ce mécanisme n'est itéré qu'une unique fois par pas de simulation. Nous faisons donc l'hypothèse simplificatrice qu'il ne peut y avoir qu'une seule création de lien par pas de simulation (i.e. par année simulée).

1. Tirage au sort de deux villes i et j à relier

Pour simuler l'effet positif de la taille d'une ville sur la probabilité de sa connexion à un réseau de transport innovant, nous avons choisi de sélectionner aléatoirement des couples de villes à relier en fonction de leur taille d'abord, puis de leur potentiel d'interaction. Le mécanisme de tirage aléatoire de type *lottery* (ou loterie) est un tirage au sort qui permet de donner à chaque élément une probabilité de tirage qui soit pondérée par un de ces attributs.

Durant le déroulement d'un pas de simulation de SimpopNet, deux villes sont sélectionnées aléatoirement à tour de rôle. Le premier tirage, celui de la ville i , est fait sous le principe de la loterie selon la population (P_t^i à l'instant t). Plus la ville a une forte population et plus la probabilité qu'elle soit sélectionnée est forte. En effet, la probabilité $Q(i)$ que la ville i soit tirée au sort est :

$$Q(i) = \frac{(P_t^i)^\alpha}{\sum_0^i (P_t^i)^\alpha}$$

Le paramètre α permet de jouer sur la prédominance de l'attribut *population* dans le tirage : plus la valeur de α est forte et plus l'effet de la valeur de l'attribut sur le tirage est fort.

Le deuxième tirage, celui de la ville j , est fait sous le principe de la loterie mais selon le potentiel d'interactions W_t^{ij} avec la ville i , avec une pondération β de l'effet de la distance, tel que :

$$W_t^{ij} = \frac{P_t^i \cdot P_t^j}{(Te_t^{ij})^\beta}$$

Te_t^{ij} correspond au temps de transport pour relier i et j , si le lien innovant était effectivement créé. Il dépend donc de la distance euclidienne l_{ij} séparant les deux villes pondérée par la vitesse innovante en cours $speed_{inno}^t$:

$$Te_t^{ij} = l_{ij} / speed_{inno}^t$$

Selon ce deuxième tirage aléatoire, plus le potentiel d'interaction entre i et j est fort, plus la probabilité que j soit tirée au sort est forte. La probabilité $Q(ij)$ que la ville j soit tirée au sort est :

$$Q(ij) = \frac{(W_t^{ij})^\alpha}{\sum_0^i (W_t^{ij})^\alpha}$$

De la même façon, le paramètre α permet de jouer sur la prédominance de l'attribut *potentiel d'interactions* dans le tirage.

2. Évaluation de l'efficacité du réseau existant

Il reste maintenant à évaluer si la création d'un lien innovant reliant ces deux villes i et j se justifie au vu de l'efficacité du réseau déjà existant. On calcule pour cela l'indice d'efficacité E_t^{ij} du réseau existant. Cette efficacité est définie comme le rapport entre le temps de parcours sur le réseau existant Tr_t^{ij} (le temps de transport pour relier les deux villes en passant par le plus court chemin possible) et le temps de parcours potentiel Te_t^{ij} qui résulterait de l'ajout du lien innovant⁸ :

8. Le rapport E_t^{ij} entre les temps de transport existants Tr_t^{ij} et potentiel Te_t^{ij} rappelle l'indice de sinuosité des cours d'eau utilisé en hydrologie : cet indice fait le rapport de la longueur du cours d'eau entre un point de départ et un point d'arrivée sur la distance euclidienne entre ces deux points. Il correspond aussi dans notre utilisation à un indice de gain de temps.

$$E_t^{ij} = \frac{Tr_t^{ij}}{Te_t^{ij}}$$

3. Test de création du lien

Le seuil IS , paramètre du modèle, permet de juger si le lien entre i et j est suffisamment efficace pour être créé. Il est supérieur à 1 et quantifie le gain minimum, en temps de transport, recherché lors de la construction de la portion de voie :

- si $E_t^{ij} < IS$, le lien entre i et j n'est pas créé car le réseau est jugé suffisamment efficace
- si $E_t^{ij} > IS$, le réseau existant n'est pas assez efficace :
 - si un lien entre i et j existe déjà, on réalise une mise à jour de la vitesse sur le tronçon qui prend donc la valeur en cours $speed_{inno}^t$
 - si le lien entre i et j n'existe pas, un lien direct de vitesse $speed_{inno}^t$ est créé

4. Gestion des intersections

Lors de la création de nouveaux liens, il arrive que deux liens de même vitesse, c'est-à-dire de même niveau hiérarchique (faisant partis du même réseau de transport innovant), se croisent. Dans ces cas, une intersection à la localisation du croisement est générée. Cette intersection représente un nouveau nœud dans le graphe (les deux liens se croisant sont donc remplacés par quatre liens tous reliés à cette nouvelle intersection). Ce type de nœuds n'a cependant pas les mêmes propriétés que les nœuds-villes : ils n'ont pas de population. Ils offrent la possibilité de court-circuiter certains nœuds du graphe en modifiant les plus courts chemins. Ils jouent donc sur les calculs de temps de transport. Par ce mécanisme, les sous-graphes de chaque niveau hiérarchique du réseau de transport interurbain sont par définition planaires, ce qui ajoute au réalisme des réseaux générés par la dynamique du modèle.

5.3.3.2 Croissance scénarisée du réseau de transport : le mécanisme *scenario-network*

Le deuxième mécanisme de croissance du réseau permet de faire croître le réseau de transport de façon complètement pré-déterminée. Chaque évolution du réseau au cours de la simulation est définie à l'avance : le nombre de liens ajoutés, le pas de simulation de leur création et les deux nœuds reliés sont configurés dans un scénario de croissance du réseau. Ce mécanisme *scénarisé* permet de comparer les sorties de simulations engendrées par des mécanismes concurrents de croissance urbaine à *croissance de réseau égale*, i.e. à

effet réseau égal. En effet, si la croissance des villes dépend de la structure du réseau, il est nécessaire de contrôler l'effet réseau (i.e. la distribution des liens et donc de l'accessibilité) pour pouvoir comparer deux paramétrages différents de la croissance urbaine. Les cartes de la figure 5.17 montrent l'état initial et l'état final du réseau de communication que nous avons simulé pour obtenir les résultats présentés dans la section 5.3.5.2. Ces cartes permettent par ailleurs d'apprécier les changements d'accessibilité des villes induits par ce scénario.

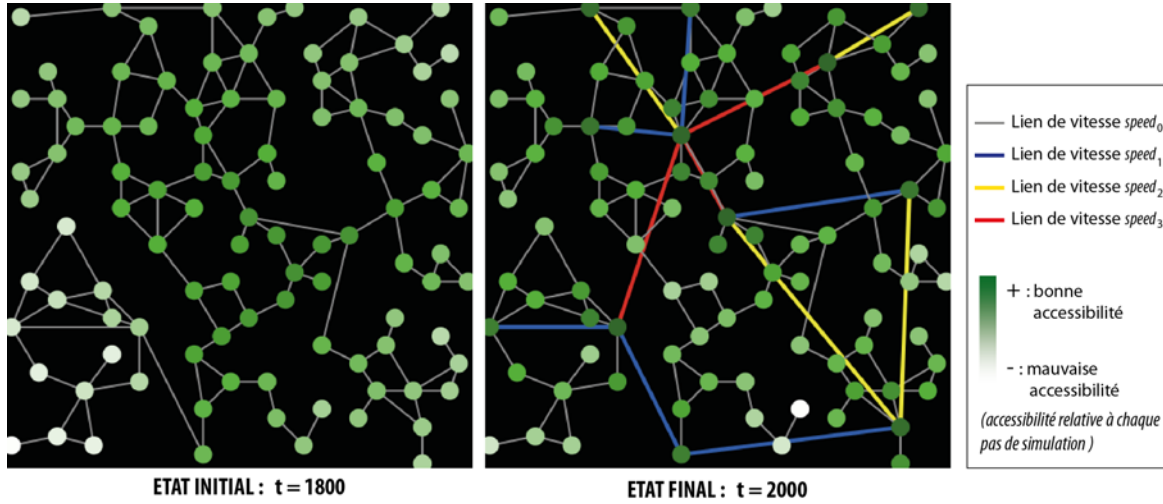


Figure 5.17 – État initial et état final du réseau interurbain tel qu'il a été défini dans le mécanisme *scenario-network*

5.3.3.3 Croissance des villes par coévolution (hypothèse h1) : le mécanisme *coevolution-cities*

Le mécanisme *coevolution-cities* simule l'effet positif de l'accessibilité sur la croissance de chaque ville (fait stylisé 3 de la section 5.1.4.4). Dans ce modèle de croissance par coévolution, le taux de croissance urbain doit prendre en compte la place de chaque ville dans le système de villes⁹, c'est à dire son potentiel d'interaction avec toutes les autres villes du système (de N villes). Nous posons ainsi :

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot (1 + H_t^i)$$

Nous voulons que H_t^i , le taux de croissance, satisfasse trois conditions :

1. $H_t^i = f(P_t^i, \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta})$: le taux de croissance doit tenir compte du potentiel

9. Les agents (les villes) ont donc une connaissance totale et parfaite de l'état du système à chaque instant.

d'interaction de la ville i avec le reste du système de villes et d'un paramètre β qui module l'effet de la distance-temps dans les interactions interurbaines.

2. $\sum_i^N H_t^i = N.m$: l'ensemble des taux de croissance à l'instant t doivent être centrés sur une valeur (normalisation avec N le nombre de villes du système et m un taux de croissance moyen).
3. $\lim_{\beta \rightarrow +\infty} H_t^i = 0$: Plus l'effet de la distance sur les interactions interurbaines est fort et moins le taux de croissance est fort. Cette hypothèse suppose que la croissance des villes est uniquement due à ses interactions avec les autres villes du système¹⁰.

Nous posons alors :

$$H_t^i = M_t \cdot \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta}$$

avec M_t , un terme pondérateur, qui peut être déterminé à partir de la deuxième condition :

$$\sum_i^N M_t \cdot \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta} = N.m$$

d'où :

$$M_t = \frac{N.m}{\sum_i^N \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta}}$$

Cependant dans ce cas :

$$\begin{aligned} \lim_{\beta \rightarrow +\infty} H_t^i &= \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \frac{N.m}{\sum_i^N \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta}} \cdot \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta} \\ &= N.m \end{aligned}$$

Pour satisfaire à la troisième condition, il faut alors que m soit fonction de β et quand β tend vers l'infini, m tende vers 0. Nous posons alors $m(\beta) = \lambda^\beta$. En effet $\lim_{\beta \rightarrow +\infty} m = 0$ car β est toujours positif, la distance ne peut pas favoriser les interactions, et λ est toujours inférieur à 1 : m est toujours inférieur à 1, des taux de croissance urbain annuel de plus de 100% sont inimaginables. Avec cette fonction, nous supposons donc que le taux de croissance moyen du système m décroît quand β augmente, i.e. quand les distance-temps défavorisent les échanges (c.f. figure 5.18). Le paramètre λ peut s'interpréter comme le

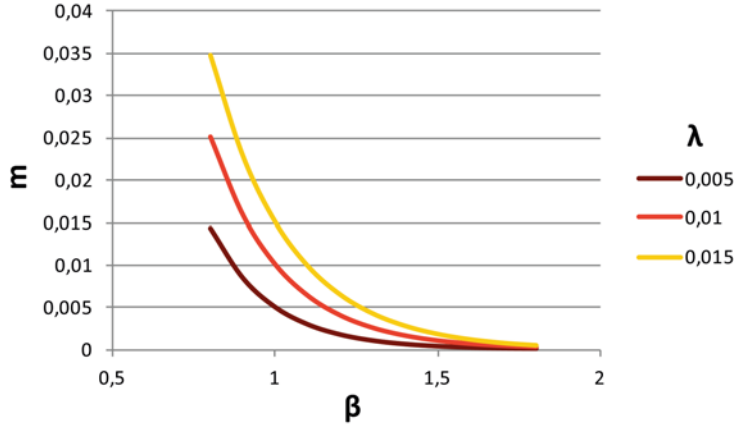


Figure 5.18 – Évolution du taux de croissance moyenne du système de villes (m) en fonction des paramètres β (la pondération de l'effet des distance-temps sur les échanges) et λ (le taux de croissance moyen annuel du système lorsque l'effet de la distance-temps n'est pas pondéré, i.e. lorsque $\beta = 1$)

taux de croissance moyen annuel du système lorsque l'effet de la distance-temps n'est pas pondéré, i.e. lorsque $\beta = 1$.

Le modèle de croissance urbaine qui caractérise l'hypothèse de coévolution peut alors s'écrire :

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot \left(1 + \frac{N \cdot \lambda^\beta}{\sum_i^N \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta}} \cdot \sum_{j \neq i}^N \frac{P_t^j}{(Tr_t^{ij})^\beta} \right)$$

5.3.3.4 Croissance aléatoire des villes (hypothèse h3) : le mécanisme *gibrat-cities*

Dans le second chapitre, nous avons détaillé le modèle proposé par GIBRAT (1931) d'accroissement proportionnel (c.f. section 2.1.2.2). Ce modèle simule un processus de croissance de villes purement aléatoire, i.e. une croissance indépendante mais proportionnelle à la taille de chaque ville. Il correspond donc bien à l'hypothèse h3, c'est-à-dire une croissance urbaine sans effet de l'accessibilité ni de la taille urbaine. Ce modèle est considéré comme une bonne première approximation de la dynamique des systèmes de villes bien que certaines déviations systématiques par rapport aux données empiriques lui soit reconnu (c.f. section 2.1.2.4). Ce modèle est donc un bon indicateur pour évaluer les améliorations que pourrait apporter le mécanisme alternatif de croissance (le mécanisme *coevolution-cities*) proposé pour simuler la dynamique de ville.

10. Dans les autres modèles de croissance de système de villes par interactions interurbaines (tel que le modèle de (FAVARO, 2007)) cette hypothèse n'est pas vérifiée, aussi la croissance est plus forte et le système plus hiérarchisé lorsque l'effet de la distance est très fort.

Selon le modèle de Gibrat, le taux de croissance de chaque ville est tiré pour chaque pas de simulation dans une loi normale de moyenne r_{Gibrat} et d'écart-type σ_{Gibrat} . Soit P_t^i la population d'une ville i à l'instant t et r_t^i son taux de croissance entre t et $t + 1$, la population de la ville i à l'instant $t + 1$ s'exprime par :

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot (1 + r_t^i)$$

$$\text{avec : } r_t^i \hookrightarrow N(r_{Gibrat}, \sigma_{Gibrat})$$

5.3.4 Déroulement d'une simulation (*Design Concept*)

5.3.4.1 Le formalisme d'implémentation du modèle SimpopNet

Le modèle SimpopNet, encore au stade de prototypage, est développé sur la plateforme de modélisation NetLogo. Il utilise par ailleurs l'extension Network¹¹, pour les calculs d'indices de graphe. Une interface web du modèle et son code source sont accessibles en ligne¹².

5.3.4.2 L'initialisation

L'initialisation du modèle SimpopNet se décompose en trois étapes de paramétrage. La première étape consiste à définir l'état initial du modèle : la distribution des tailles de villes, leur répartition spatiale et l'état initial du réseau de communication interurbain. Nous avons choisi de définir et de conserver une unique configuration initiale pour les expérimentations réalisées avec le prototype SimpopNet. Cet état initial se doit d'être représentatif de configurations réelles de système de villes (c.f. chapitre 1). Aussi, nous avons généré une configuration initiale qui présente 3 caractéristiques :

- Une distribution puissance des tailles démographiques de villes : pour aider l'interprétation des résultats de simulation, nous avons choisi de nous référer au système de villes français et son évolution entre 1800 et 2000. BRETAGNOLLE, MATHIAN et al. (2000) indiquent que vers 1800 la taille de la plus grande ville du système de villes français (Paris) avoisinait les 500 000 habitants, et que la distribution de fréquence des tailles urbaines du système (i.e. la hiérarchisation du système) était bien résumée par une fonction puissance (avec un R^2 de 0,99) d'exposant¹³ -0,69. Nous appelons cet exposant *indice de hiérarchie*. Nous avons produit de façon aléatoire

11. <https://github.com/NetLogo/NW-Extension>

12. <http://simplenet.parisgeo.cnrs.fr>

13. i.e. la pente de l'ajustement linéaire de la distribution des tailles de villes dans le graphique bi-logarithmique

un état initial comportant 100 villes, choisi parmi un grand nombre d'initialisations pour ces caractéristiques très proches de celles de l'état observé. La distribution des tailles urbaines ainsi générée varie entre 21078 et 495525 habitants, et la fréquence des tailles suit une fonction puissance d'exposant -0,67.

- Une répartition spatiale suivant une distribution pseudo-christallérienne : il existe des distances minimales d'espacement entre catégories de taille de villes, les plus grandes villes sont plus éloignées entre elles que les plus petites villes.
- Un réseau de liens entre les villes qui conserve la même logique hiérarchique cristallérienne : les petites villes établissent des connexions à plus faible distance que les plus grandes villes.

Nous décrivons dans l'annexe C les mécanismes qui ont permis de générer une telle situation initiale. Cette configuration initiale est retranscrite dans un fichier *.csv* qui est chargé à chaque initialisation du modèle de l'interface web. Le fichier d'initialisation est disponible à la même adresse. La figure 5.19 donne une représentation graphique de cette situation initiale.

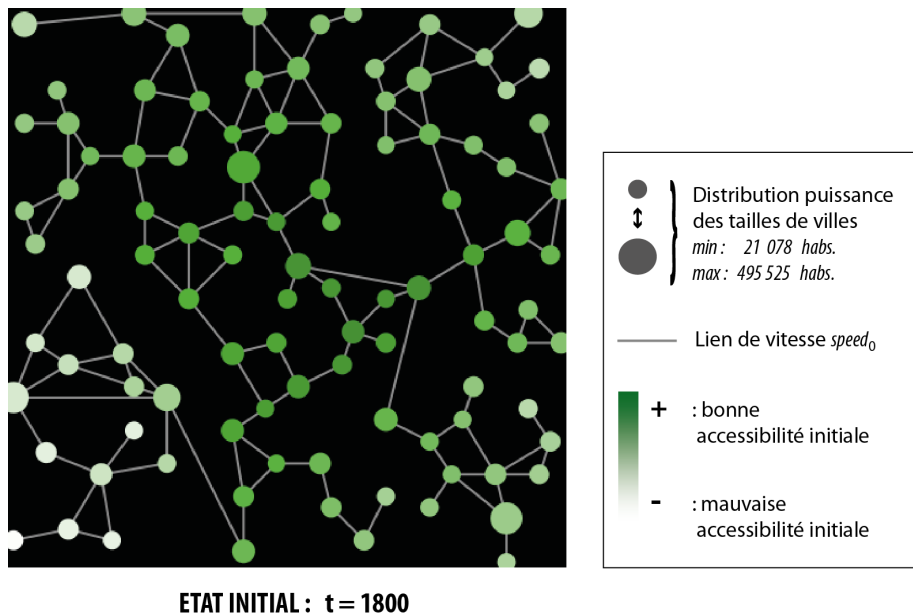


Figure 5.19 – État initial du modèle SimpopNet

La deuxième étape de paramétrage consiste à choisir les mécanismes de simulation (c.f. figure 5.16). Il faut ainsi sélectionner :

- le modèle de croissance du réseau, parmi deux choix :
 - le mécanisme *coevolution-network*

Paramètre	mécanisme actif correspondant	Description
$speed_0$	<i>coevolution-network</i> et <i>coevolution-cities</i>	La vitesse des liens lents (initialisation)
$speed_1$	<i>coevolution-network</i> et <i>coevolution-cities</i>	La vitesse des liens de la première vague d'innovations (entre 1800 et 1860)
$speed_2$	<i>coevolution-network</i> et <i>coevolution-cities</i>	La vitesse des liens de la deuxième vague d'innovations (entre 1860 et 1960)
$speed_3$	<i>coevolution-network</i> et <i>coevolution-cities</i>	La vitesse des liens de la deuxième vague d'innovations (entre 1960 et 2000)
α	<i>coevolution-network</i>	La prédominance de l'attribut dans le tirage aléatoire de la loterie
IS	<i>coevolution-network</i>	Le seuil d'efficacité du réseau
r_{Gibrat}	<i>gibrat-cities</i>	Le taux de croissance moyen du modèle de Gibrat (loi Normale)
σ_{Gibrat}	<i>gibrat-cities</i>	L'écart-type du taux de croissance moyen du modèle de Gibrat (loi Normale)
β	<i>coevolution-cities</i>	L'effet de la distance sur les interactions interurbaines
λ	<i>coevolution-cities</i>	Le taux de croissance moyen annuel du système quand $\beta = 1$

Tableau 5.3 – Les paramètres d'état du modèle SimpopNet

- le mécanisme *scenario-network*
- le modèle de croissance des villes, parmi deux choix :
 - le mécanisme *coevolution-cities*
 - le mécanisme *gibrat-cities*

La dernière étape de paramétrage consiste à fixer les paramètres d'état du modèle en fonction des mécanismes de simulation choisis. Ces paramètres sont détaillés dans le tableau 5.3, en fonction des mécanismes de simulation choisis.

5.3.4.3 La condition d'arrêt

Le modèle SimpopNet simule 200 pas de simulation qui correspondent à 200 années de 1800 à 2000. Cette condition d'arrêt est fixe.

5.3.4.4 Déroulement d'un pas de simulation

Le déroulement d'un pas de simulation est décrit par des diagrammes d'activité UML : le diagramme de la figure 5.20 donne le déroulement général d'un pas de simulation, les diagrammes de la figure 5.21 précisent deux étapes de ce déroulement général. Pour plus de détails, le lecteur peut se reporter au code source du modèle, disponible en ligne¹⁴.

14. <http://simpopnet.parisgeo.cnrs.fr>

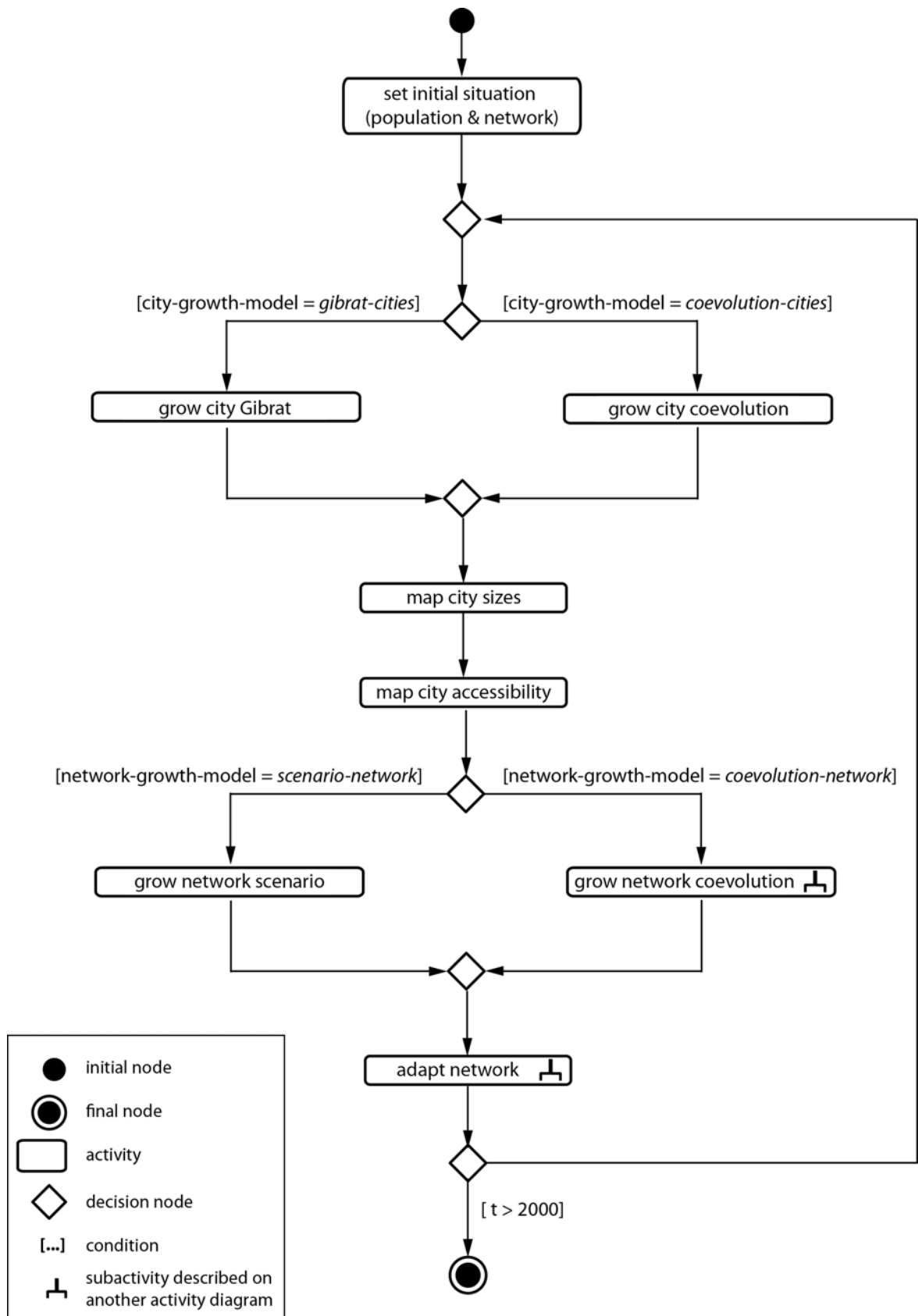


Figure 5.20 – Diagramme général d'activité du modèle SimpopNet

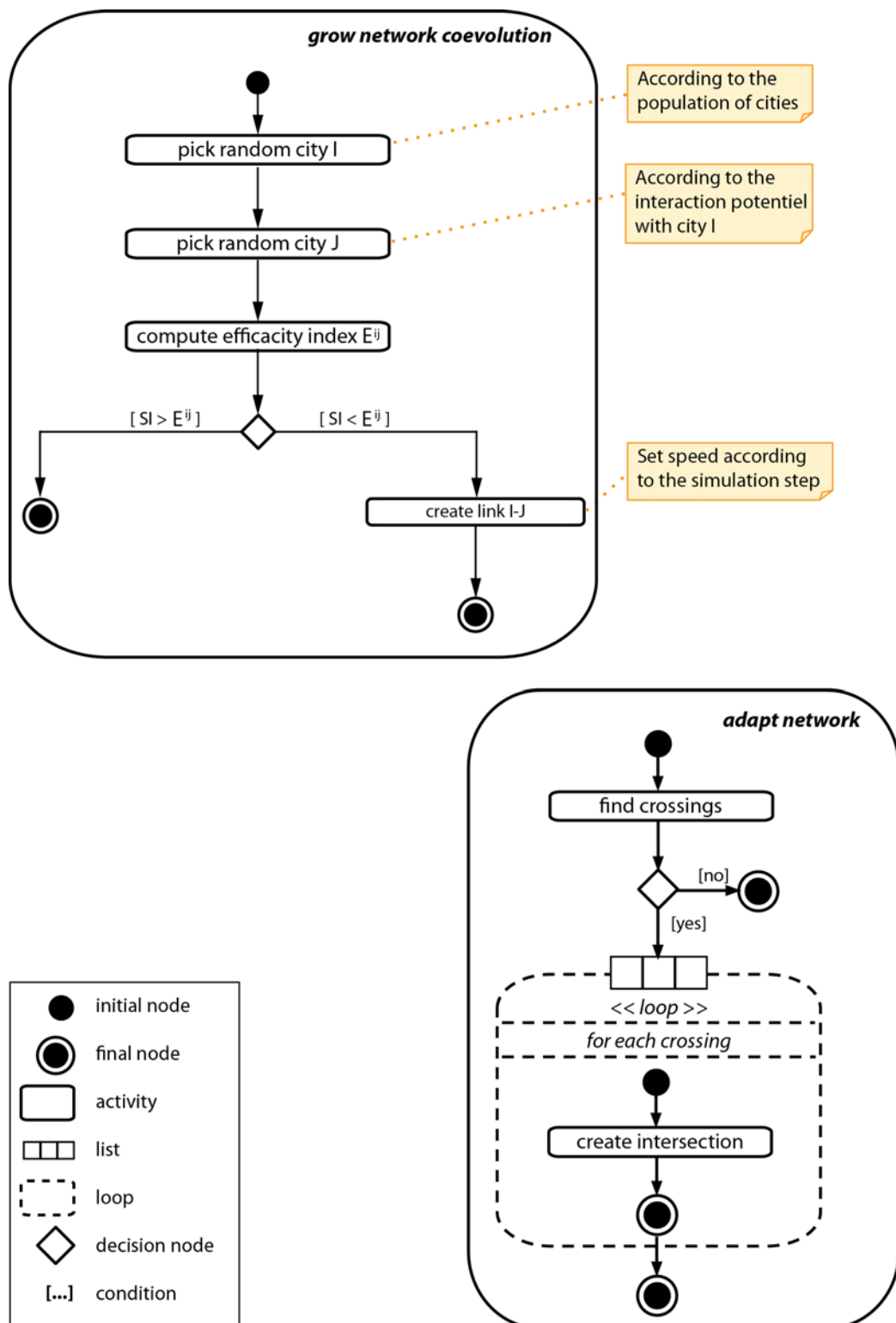


Figure 5.21 – Diagrammes d'activités complémentaires du modèle SimpopNet

5.3.5 Les premiers résultats de l'exploration du modèle SimpopNet

5.3.5.1 Paramétrages du modèle SimpopNet pour deux expérimentations

Le modèle SimpopNet est en cours de développement et d'exploration. La prochaine étape serait de mettre en œuvre des explorations automatisées du modèle qui guideront le calibrage du modèle et l'évaluation de ses mécanismes, tel que nous avons pu le réaliser avec le modèle SimpopLocal. L'emploi des méthodes utilisées pour SimpopLocal nécessite la définition d'objectifs de calibrage (c.f. section 4.1.2.3). Deux des objectifs définis pour SimpopLocal (la taille du plus grand point de peuplement et la forme de la distribution rang-taille des points de peuplement en fin de simulation) sont transférables au modèle SimpopNet avec quelques ajustements. Mais comme SimpopNet fait évoluer un réseau en plus d'un système de villes, il est aussi nécessaire de définir pour ce modèle une nouvelle forme d'objectif de calibrage qui concerne la structure recherchée du réseau en fin de simulation. Cependant des objectifs relatifs à la structure du réseau simulé ne sont pas faciles à définir. En effet, BEGUIN et THOMAS (1997) ont réalisé une étude des indicateurs de mesure de la forme des réseaux et ont conclu qu'"[a]ucun indicateur ou groupe d'indicateurs ne permet de caractériser avec certitude une forme de réseau de communication, de départager deux réseaux de façon non ambiguë". Néanmoins la réflexion autour de l'automatisation de l'exploration du modèle SimpopNet est en cours.

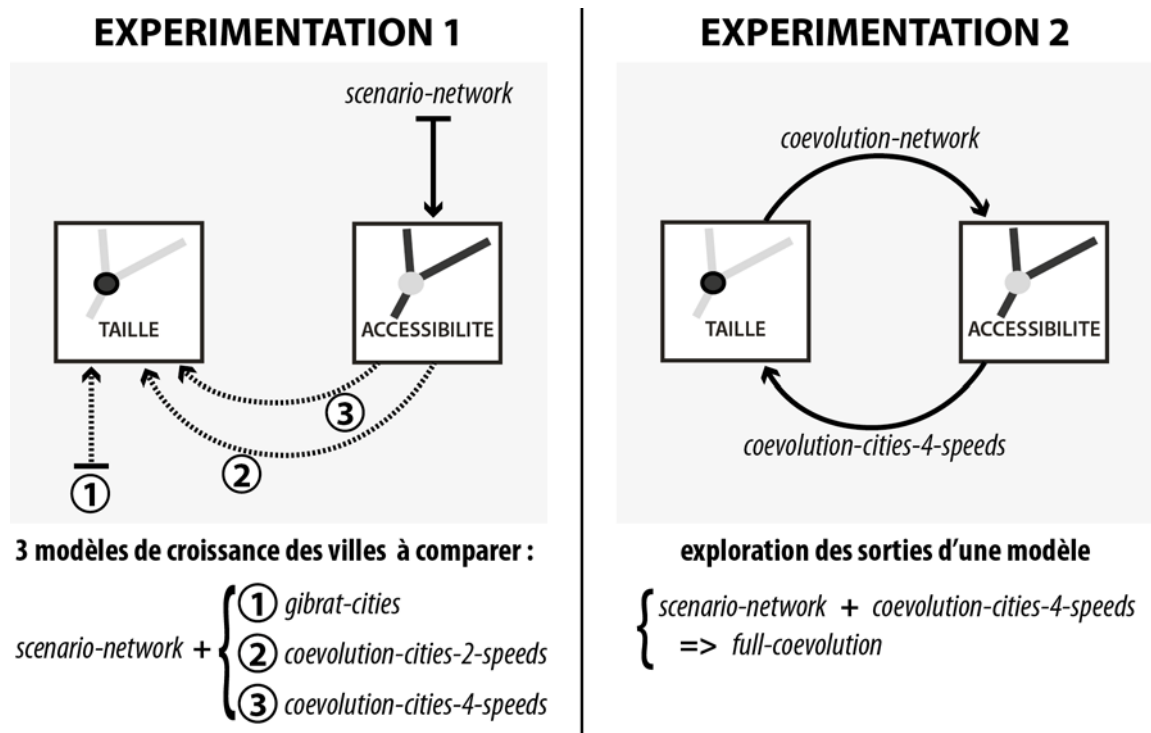


Figure 5.22 – Deux expérimentations pour le prototype SimpopNet

En attendant, nous avons mené deux expérimentations avec le prototype SimpopNet (c.f. figure 5.22). Ces expérimentations donnent des résultats très encourageants : elles montrent la capacité du modèle SimpopNet à engendrer des dynamiques des systèmes urbains représentatives des grands faits stylisés des dynamiques urbaines et nous confortent dans la nécessité d’une exploration intensive du modèle. La première expérimentation (section snet-exp1) met en évidence les différences dans les dynamiques de croissance et de hiérarchisation qui sont induites par des modèles concurrents de croissance urbaine. Trois modèles de croissance des villes sont ainsi comparés : le modèle de Gibrat et deux modèles de l’effet de l’accessibilité sur la croissance urbaine qui correspondent à deux paramétrages différents du mécanisme *coevolution-cities*. La deuxième expérimentation (section 5.3.5.3) permet d’analyser les formes des dynamiques de systèmes de villes engendrées par la simulation de la boucle complète de coévolution (hypothèse 3) telle que nous l’avons postulée en section 5.1.5.

Pour ces deux expérimentations nous avons réalisé quatre paramétrages du modèle SimpopNet (3 pour la première expérimentation et 1 pour la deuxième) en nous référant à l’évolution du système de villes français entre 1800 et 2000. Ainsi, la situation initiale de référence en terme de forme de hiérarchisation du système est celle de la France (c.f. section 5.3.4.2), et les résultats de simulations sont ensuite comparés à la forme de hiérarchisation du système urbain français en 2000. En 1800, la plus grande ville française (Paris) compte 500000 habitants environ et le système de ville présente un indice de hiérarchie¹⁵ de 0,69 environ (BRETAGNOLLE, MATHIAN et al., 2000). En 2000, la plus grande ville française (toujours Paris) compte près de 11 millions d’habitants et le système de ville présente un indice de hiérarchie de 1 environ (d’après l’INSEE et BRETAGNOLLE, MATHIAN et al. (2000)). Le taux de croissance moyen annuel des villes sur cette période est proche de 1% (avec des fluctuations au cours de la période) et présente un écart-type du même ordre de grandeur (BRETAGNOLLE, MATHIAN et al., 2000 ; GUÉRIN-PACE et PUMAIN, 1990).

Le tableau 5.4 indique comment sont paramétrés les quatre modèles simulés pour ces deux expérimentations. Le modèle *gibrat-cities* de la première expérimentation a été paramétré avec un taux de croissance moyen annuel (1%) et un écart-type de ce taux (1%) représentatifs des données empiriques. Deux modèles de l’effet de l’accessibilité sur la croissance urbaine sont distingués. Le premier modèle *coevolution-cities-2-speeds* ne fait pas évoluer les vitesses de circulation des liens innovants : tous les liens ajoutés lors de la simulation présentent la même vitesse de circulation. Cette vitesse de circulation reste faible comparée aux vitesses qui peuvent être atteintes dans le deuxième modèle *coevolution-cities-4-speeds*. En effet ce modèle fait évoluer les vitesses de circulation en fonction de l’évolution des vitesses moyennes enregistrées historiquement (c.f. section 5.3.2). En com-

15. L’indice de hiérarchisation est égal à la valeur de l’exposant de l’ajustement de la hiérarchie urbaine par une fonction puissance.

	Modèle <i>gibrat-cities</i>	Modèle <i>coevolution- cities-2- speeds</i>	Modèle <i>coevolution- cities-4- speeds</i>	Modèle <i>full- coevolution</i>
<i>coevolution- network</i>				✓
<i>scenario- network</i>		✓	✓	
<i>coevolution- cities</i>		✓	✓	✓
<i>gibrat- cities</i>	✓			
<i>speed</i> ₀		1	1	1
<i>speed</i> ₁		5	5	5
<i>speed</i> ₂		5	20	20
<i>speed</i> ₃		5	75	75
α				3
<i>IS</i>				12
<i>r</i> _{Gibrat}	0,01			
σ _{Gibrat}	0,01			
β		1,1	1,1	1,1
λ		0,01	0,01	0,01

Tableau 5.4 – Les quatre paramétrages de SimpopNet pour les deux expérimentations réalisées (les trois premiers modèles pour la première expérimentation et le dernier modèle pour la deuxième expérimentation)

parant ces deux modèles de l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine, il est possible de mettre en évidence l'effet de l'évolution des vitesses des échanges sur la hiérarchisation du système. Mais pour comparer ces dynamiques de croissance toutes choses égales par ailleurs, il est nécessaire de les simuler dans les mêmes conditions environnementales, c'est-à-dire avec le mécanisme de croissance de réseau scénarisée (évolutions du réseau qui ont les mêmes impacts sur les accessibilités aux mêmes moments). Le paramètre β a été fixé pour que le modèle *coevolution-cities-4-speeds* simule une croissance moyenne annuelle du système de 1% sur la période 1800-2000 avec un λ égal à 0,01. Cette valeur a été trouvée par essai-erreur, en testant par la simulation différentes valeurs de β .

5.3.5.2 Première expérimentation : la hiérarchisation du système de peuplement par l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine

Nous cherchons dans cette première expérimentation à comparer la forme de la hiérarchisation finale du système engendrée par les trois modèles alternatifs de croissance urbaine : le modèle de gibrat-cities, le modèle *coevolution-cities-2-speeds* et le modèle *coevolution-cities-4-speeds* (c.f. paramétrage dans le tableau 5.4).

Les résultats sont présentés dans le graphique de la figure 5.23. Le mécanisme du modèle de croissance *gibrat-cities* étant stochastique, il est nécessaire de le répliquer pour s'assurer de la représentativité des sorties de simulation obtenues. Dans cette première expérimentation, 11 simulations ont été réalisées. Sur ces 11 simulations, la taille de la plus grande ville atteint en moyenne 3,4 millions d'habitants avec un écart-type de 1 million. Nous avons représenté sur le graphique de la figure 5.23 la simulation du modèle *gibrat-cities* qui présente le comportement médian parmi les 11 simulations. Le mécanisme *coevolution-cities* étant déterministe, une unique simulation suffit (à état initial et croissance de réseau égales). Le graphique de la figure 5.23 met en évidence trois conclusions majeures :

- Le modèle *gibrat-cities* n'est pas capable d'engendrer une hiérarchisation satisfaisante du système urbain, malgré un taux de croissance annuel et un écart-type de ce taux représentatifs des données empiriques. En effet le modèle de Gibrat conduit à des indices de hiérarchie en 2000 proches de 0,68 alors que la France présente à la même date un indice de hiérarchie proche de 1. Par ailleurs la plus grande ville du système est sous-évaluée. Le modèle produit en effet des systèmes urbains dont la plus grande ville est comprise entre 3 et 4 millions d'habitants environ, ce qui représente moins de la moitié de l'aire urbaine parisienne en 2000. Ces résultats ont déjà été montrés par BRETAGNOLLE, MATHIAN et al. (2000), qui avaient précisé que pour obtenir des hiérarchisations plus représentatives, il était nécessaire de doubler, voire tripler l'écart-type du taux de croissance moyen annuel par rapport aux valeurs déterminées par les données d'observation.
- Les modèles *coevolution-cities-2-speeds* et *coevolution-cities-4-speeds* qui prennent en compte l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine engendrent des hiérarchisations du système beaucoup plus proches des données historiques. En effet les deux modèles produisent des systèmes aux indices de hiérarchie proche de 1. Le modèle *coevolution-cities-4-speeds* simule cette hiérarchisation grâce à une croissance moyenne annuelle du système de 0,99%. La moyenne des taux de croissance moyens annuels des villes sur la même période est de 0,63% (avec un écart-type de 0,24%). Ce décalage entre la moyenne des taux de croissance des villes et le taux de croissance du système montre que la distribution des taux de croissance urbains ne suit

pas une distribution de type loi normale : les plus grandes villes ont un taux de croissance légèrement plus élevé que ceux des plus petites villes. Cet effet montre donc que le mécanisme *coevolution-cities* produit un processus de sélection par la croissance : les plus grandes villes sont les plus dynamiques. C'est cette sélection hiérarchique qui accélère le processus de hiérarchisation par rapport au mécanisme de croissance *gibrat-cities*. La sélection hiérarchique est mise en évidence par la valeur de l'indice de corrélation (de 0,34) entre le taux de croissance moyen annuel urbain sur l'ensemble de la période simulée et la taille des villes en fin de simulation. Cette valeur est toutefois supérieure à celles mesurées pour cette même période en France (de l'ordre de 0,05 à 0,1 c.f. figure 5.7). L'effet de sélection simulé est donc un peu fort comparé aux données empiriques.

- L'évolution des vitesses a un fort impact sur la dynamique de hiérarchisation. En effet, l'évolution de la vitesse permet d'opérer une discrimination (un effet de sélection) encore plus forte sur les croissances urbaines qui a pour effet d'augmenter l'indice de hiérarchie (1,13 contre 0,95) et d'accroître la taille de la plus grande ville du système (8,7 millions contre 4,7 millions), alors que le bas de la hiérarchie du système reste semblable.

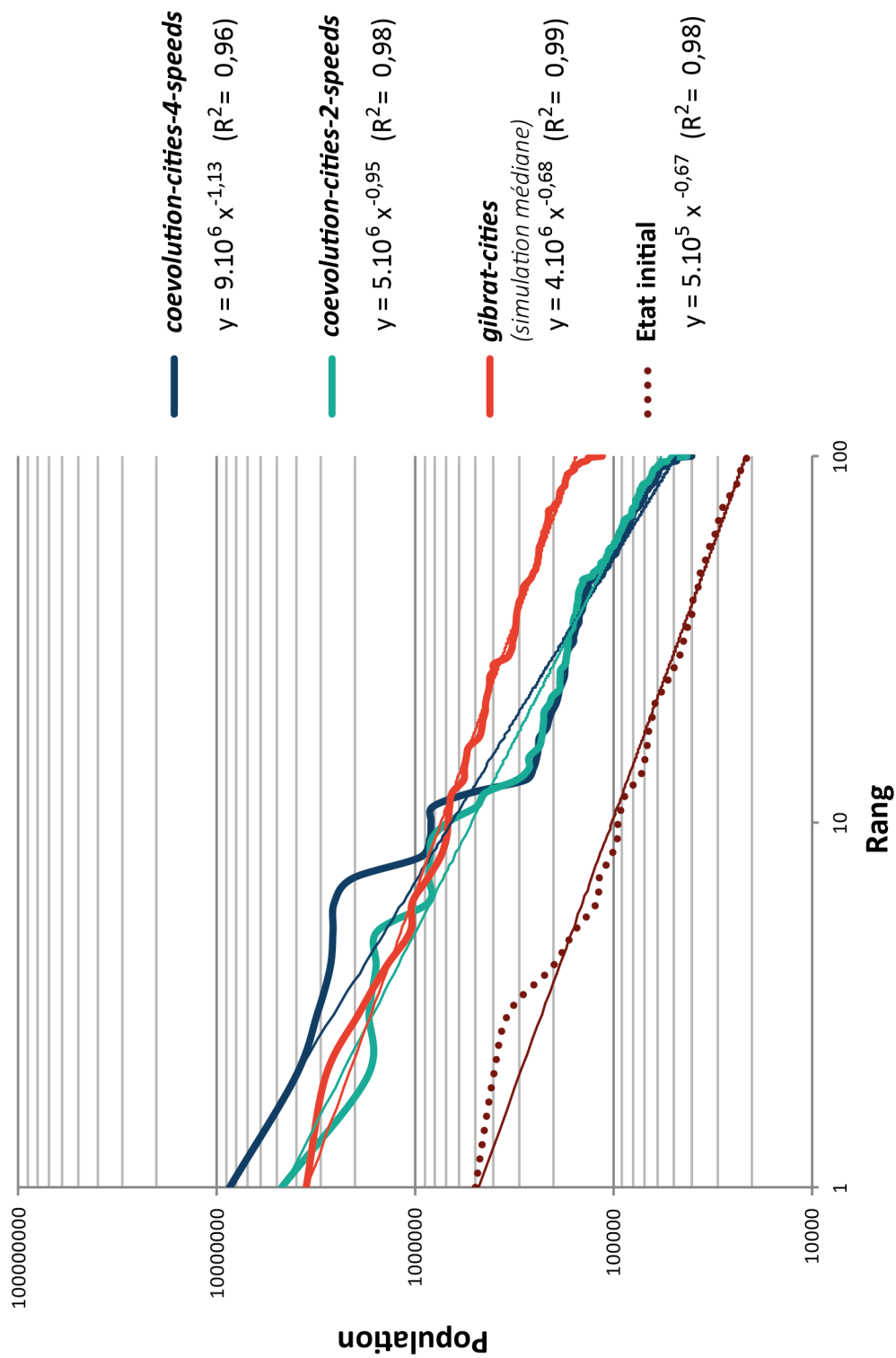


Figure 5.23 – Comparaison de la hiérarchisation finale du système urbain engendrée par trois modèles de croissance urbaine (200 pas de simulation)

La figure 5.24 permet de visualiser l'effet du paramètre β (pondération de l'effet de la distance) sur la hiérarchisation du système urbain et sur la taille de la plus grande ville du système simulé¹⁶. Plus le frein opéré par la distance est fort (plus β est grand), plus la hiérarchisation du système urbain est faible et moins la taille de la plus grande ville est grande. Le mécanisme *coevolution-cities* repose donc bien sur la place que tient chaque ville dans le jeu des interactions interurbaines : plus les interactions sont favorisées et plus le moteur de la croissance est fort pour les villes les plus accessibles et discriminant pour les villes les moins accessibles.

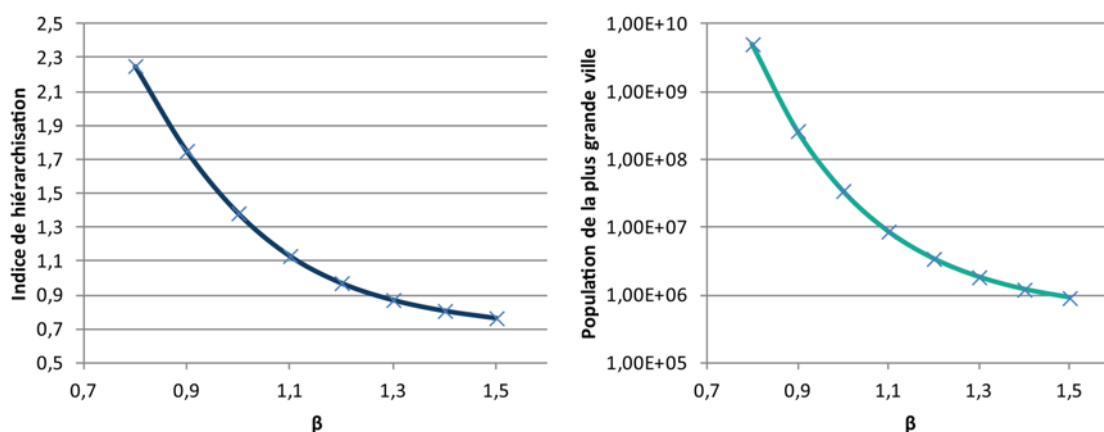


Figure 5.24 – Effet du paramètre β (pondération de l'effet de la distance) sur la hiérarchisation du système urbain
(L'indice de hiérarchisation est égal à la valeur de l'exposant de l'ajustement de la hiérarchie urbaine en fin de simulation par une loi puissance)

5.3.5.3 Deuxième expérimentation : simulation d'un système urbain en co-évolution avec le réseau de transport

Nous présentons dans cette section les résultats obtenus par la simulation de la boucle complète de coévolution entre un système de villes et son réseau de transport (expérimentation 2 de la figure 5.22). Le paramétrage du modèle *full-coevolution* de cette expérimentation est donné par le tableau 5.4. Nous détaillons ici les résultats issus d'une unique simulation¹⁷ du modèle *full-coevolution*.

La carte de la figure 5.25 présente l'état final de la simulation. Au cours de la simulation, 12 liens ont été créés sur les 142 comptés en fin de simulation, ce qui représente 8% du réseau final. Le graphique de la figure 5.26 montre l'évolution de l'indice de corrélation

16. Tous les ajustements par des fonctions puissance ont été obtenus avec des R^2 compris entre 0,96 et 0,98.

17. Pour reproduire les sorties de simulation décrites dans cette section, il faut paramétrer la graine aléatoire de la simulation à 31 (dans l'interface graphique : paramétrer *myseed* = 31 et actionner le bouton "*myseed*").

entre la taille des villes et leur indice de Shimbel. L'indice de Shimbel d'un nœud (i.e. une ville) se comptabilise en additionnant toutes les distances (pondérées) des plus courts chemins pour relier le nœud considéré à tous les autres nœuds du graphe. Plus cet indice est grand et moins le nœud est accessible. L'indice de Shimbel correspond donc à un indice d'éloignement dans le réseau. La figure 5.26 montre que l'indice de corrélation qui était presque nul¹⁸ en début de simulation s'accroît avec le déroulement de la simulation pour atteindre à l'état final une valeur de -0,4. En fin de simulation il existe donc une corrélation négative (bien qu'un peu faible) entre la taille et l'éloignement d'une ville dans le réseau, c'est-à-dire qu'il existe une corrélation positive entre la taille d'une ville et son accessibilité. Ce graphique montre que les deux variables sont liées dans leur évolution ce qui semble indiquer la mise en place au cours de la simulation d'une coévolution entre le réseau de communication interurbain et les tailles de villes.

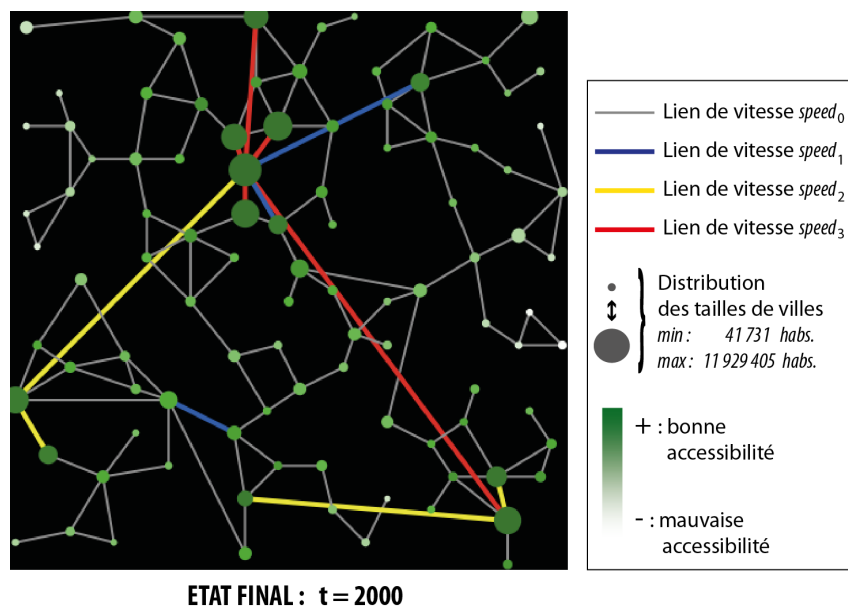


Figure 5.25 – cartographie de l'état final de la simulation de la boucle complète de coévolution (*myseed* = 31) du modèle SimpopNet

Sur les figures 5.27 et 5.29, il est possible de suivre l'évolution du système de villes. La hiérarchisation (c.f. figure 5.27) du système est progressive et atteint un indice de hiérarchisation de 1,22 en fin de simulation. Les graphiques de la figure 5.29 ont été

18. Cette valeur de corrélation nulle (voire légèrement positive) à l'état initial entre l'indice de Shimbel et la taille des villes indique que le mécanisme de génération de situation initiale décrit en annexe C n'est pas encore optimal. Il faudrait parvenir à générer des configurations initiales dans lesquelles les distributions des tailles de villes et de réseau de communication soient encore plus représentatives des configurations géographiques observées

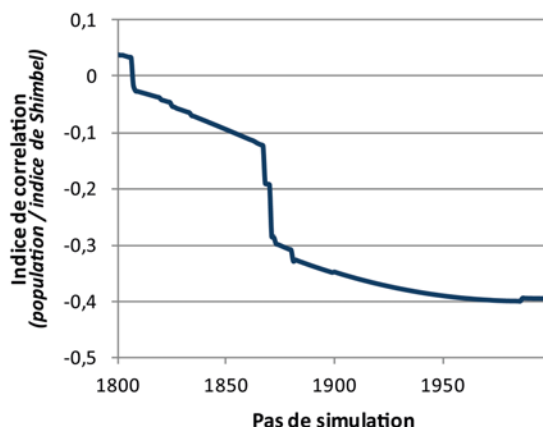


Figure 5.26 – Évolution de l'indice de corrélation (de Spearman) entre la population et l'indice de Shimbel (indice d'éloignement) des villes

obtenus par le traitement TrajPop¹⁹, décrit en section 4.2.2²⁰. Ce traitement permet de résumer et de différencier les types de trajectoire de villes observées lors de l'évolution du système urbain. La simulation étudiée présente ainsi des trajectoires de villes qui prennent du poids dans le système (classes 1 et 4), des trajectoires de villes qui au contraire en perdent (classe 2) et des trajectoires de villes qui maintiennent leur place dans le système (classe 3). Les 10 plus grandes villes du système en fin de simulation constituent l'ensemble des villes comprises dans les classes 1, 3 ou 4, c'est-à-dire les catégories des villes qui se sont maintenues ou ont gagné du poids dans le système. La plus grande ville à l'état initial a conservé sa place en fin de simulation. Cependant la 2e et la 3e plus grande ville à l'initialisation se sont retrouvées respectivement en 4e et 5e place en fin de simulation, détrônées par les villes classées 26e et 50e en début de simulation. Ces dernières villes ont bénéficié d'un gain en accessibilité majeur durant la simulation (ou d'un emplacement chanceux dans le graphe), ce qui leur a procuré un avantage significatif dans les taux de croissance urbaine.

Les perturbations dans l'ordre hiérarchique sont courantes sur des périodes de 200 années comme le montrent GUÉRIN-PACE et PUMAIN (1990) : les villes de Nice et Grenoble, classées en dessous des 30 plus grandes villes de France en 1831, ont ainsi pris plus de 20 places chacune en 150 ans. Mais les perturbations simulées par le modèle de coevolution dans le haut de la hiérarchie sont peut-être un peu plus fortes que les perturbations généralement observées. Cette instabilité pourrait être expliquée par deux raisons. Soit le

19. (<http://trajpop.parisgeo.cnrs.fr/>)

20. La méthode TrajPop compare d'abord les profils d'évolution de population grâce à une analyse factorielle des correspondances (avec distance du χ^2) qui génère une matrice des écarts entre les trajectoires des points de peuplement. Sur cette matrice est ensuite appliquée une classification ascendante hiérarchique (avec la méthode de Ward, qui tend à minimiser la variance intra-classe et maximiser la variance inter-classe).

mécanisme *coevolution-cities* est trop discriminant sur l'accessibilité urbaine et les taux de croissance ne prennent pas assez en compte le poids de l'histoire du système. Soit l'état initial de la distribution spatiale des tailles de villes et du réseau de communication interurbain n'est pas assez représentatif de situations géographiquement possibles. Ce déséquilibre initial provoque une phase de réadaptation du système sous l'effet des processus géographiques simulés. Ces deux effets potentiels, peut-être même cumulés, pourraient être à l'origine de réorganisations majeures de la hiérarchie urbaine si taille et accessibilité ne sont pas en correspondance dès le début. Ce constat montre à la fois l'importance de la situation initiale pour le déroulement de la simulation, mais aussi peut-être la force de sélection du mécanisme *coevolution-cities* (ce qui est corroboré par les forts indices de corrélation entre taille et croissance urbaine engendrés par ce mécanisme et montrés dans la première expérimentation en section 5.3.5.2). Pour autant, il s'agit bien ici de la description des sorties d'une unique simulation. Il serait nécessaire de mettre en œuvre une exploration plus large du modèle pour confirmer ces premières observations.

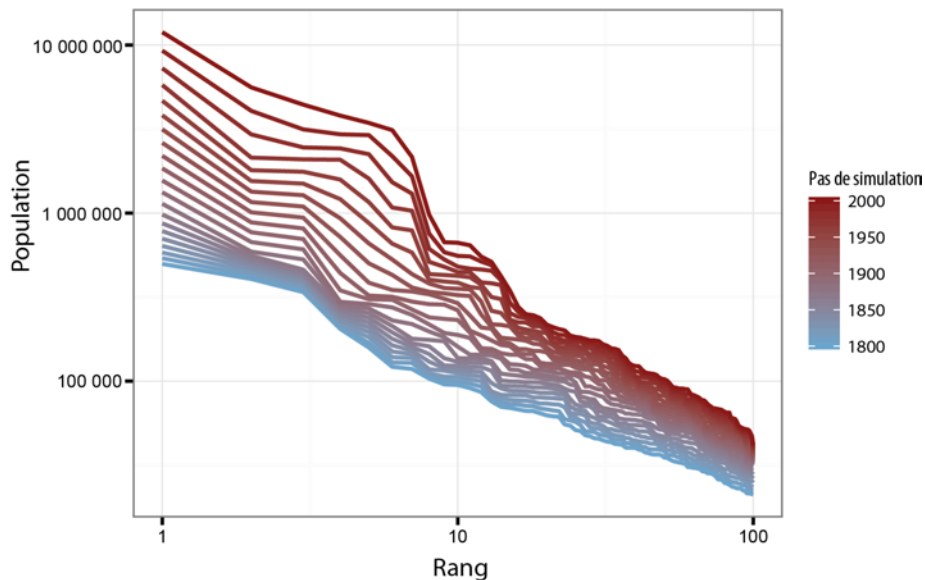


Figure 5.27 – Évolution de la hiérarchisation du système urbain au cours de la simulation de la boucle complète de coévolution du modèle SimpopNet

Les résultats apportés par ces deux expérimentations sont encourageants. Comme nous l'avons constaté, le mécanisme *coevolution-cities*, qui simule l'effet de l'accessibilité sur la croissance urbaine, permet de modéliser un processus de hiérarchisation qui soit plus représentatif des dynamiques de croissance réelles que ne le propose le mécanisme de croissance urbaine de Gibrat. Le mécanisme *coevolution-cities* opère comme un mécanisme de sélection dans le processus de croissance, qui donne un avantage de croissance systématique aux villes les plus accessibles par rapport aux villes les moins accessibles. Cet avantage sélectif est plus ou moins marqué en fonction des contrastes dans les vitesses de circulation des échanges interurbains : plus les contrastes sont forts et plus la

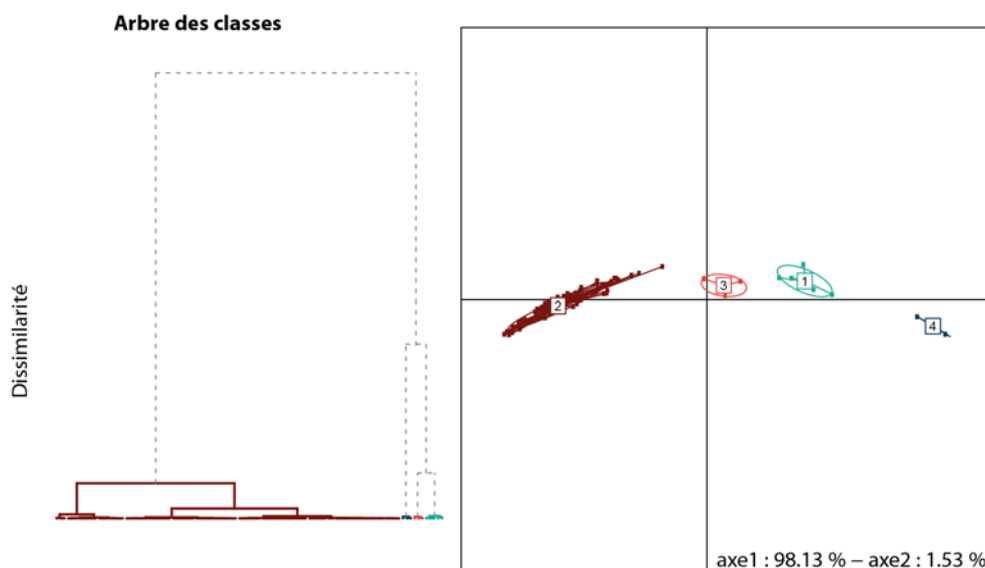


Figure 5.28 – Résultats de la classification ascendante hiérarchique sur les trajectoires des villes lors de la simulation de la boucle complète de coévolution du modèle SimpopNet

hiérarchisation du système est forte. Par ailleurs, la modélisation de la boucle complète de coévolution permet de simuler plusieurs types de trajectoires de ville caractéristiques (BRETAGNOLLE, MATHIAN et al., 2000), qui conduisent à une hiérarchisation du système à la cinétique relativement réaliste. Les degrés de hiérarchisation atteints sont légèrement plus forts que ceux observés sur le système réel ciblé. L’effet de sélection hiérarchique est très discriminant. Cet effet peut être dû à un manque de raffinement des mécanismes de la boucle de coévolution, mais aussi à un manque de calibrage suffisamment précis. Il nous reste donc maintenant à mettre en œuvre le protocole de calibrage développé pour SimpopLocal pour savoir si les mécanismes de modèle SimpopNet sont capables de rendre compte de la dynamique de hiérarchisation des systèmes urbains à partir d’un paramétrage représentatif de situations géographiques réelles. La mise en place de cette nouvelle exploration offre un nouveau défi : celui de la définition d’objectifs de calibrage relatifs au développement de réseau de transport. Il s’agira de définir des indicateurs du réseau capables de différencier des évolutions différentes de sa structure et d’évaluer ces évolutions par comparaison avec des évolutions représentatives de réseaux réels. Ce travail de définition s’avérera certainement très stimulant, cet indicateur n’étant pas élémentaire de premier abord (BEGUIN et THOMAS, 1997).

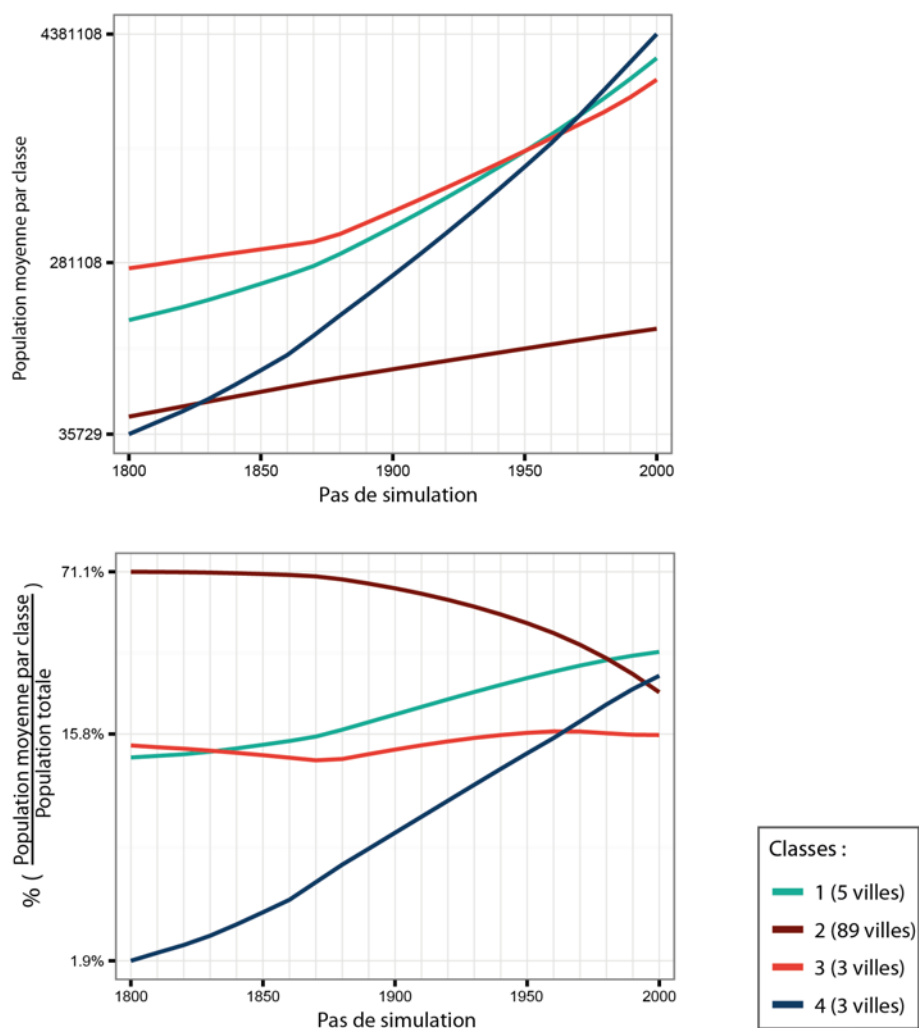


Figure 5.29 – Trajectoires des villes par classes lors de la simulation de la boucle complète de coévolution du modèle SimpopNet

Conclusion : un modèle plein d'avenir

Nous avons proposé dans ce cinquième chapitre un modèle pour simuler la coévolution entre système de villes et réseau de transport. Bien que la coévolution entre taille et accessibilité d'une ville ne soit par encore formellement prouvée, de nombreux indices tendent à montrer que des processus d'effets réciproques entre la taille et l'accessibilité des villes seraient en action. Le modèle SimpopNet permet de tester ces hypothèses à l'échelle micro-géographique et d'en observer les conséquences sur l'organisation du système de peuplement. Les premiers résultats obtenus sont comparés à l'évolution des villes françaises de 1800 à 2000. Ils montrent que les mécanismes de sélection simulés par la boucle de coévolution sont capables d'engendrer des dynamiques de système de peuplement très proches des dynamiques observées. En outre, les résultats obtenus sont meilleurs que ceux simulés par le modèle Gibrat, pourtant considéré comme une bonne première approximation des dynamiques urbaines. Ces premières analyses révèlent que le modèle SimpopNet est très prometteur.

L'innovation dans ce premier prototype du modèle SimpopNet est double. Le modèle propose un mécanisme de croissance du réseau qui tient compte de l'organisation spatiale des villes et qui est endogène à la dynamique du modèle. Cette introduction endogène de nouveautés dans le réseau de transport engendre un changement de répartition spatiale de l'accessibilité qui a des répercussions sur la répartition des dynamiques de croissance urbaine. Le modèle SimpopNet propose donc une modélisation pionnière de la boucle de coévolution à l'échelle du système de ville.

Le modèle présenté dans ce chapitre est en cours de développement et d'exploration. Les premiers résultats de simulation indiquent que les processus de sélection simulés par les mécanismes de coévolution ne sont pas suffisamment bien adaptés. La mise en place d'un protocole de calibrage automatisé permettra de déterminer si ces mécanismes sont capables de rendre compte d'une dynamique de systèmes urbains encore plus réaliste. En parallèle, nous envisageons de raffiner les mécanismes déjà développés. Pour raffiner le mécanisme de croissance urbaine, on pourrait ainsi considérer que les taux de croissance urbains r_t^i seraient induits par la combinaison (suivant une proportion γ) d'une croissance H_t^i imputable aux dynamiques interurbaines (tel que le mécanisme de coévolution actuel) et d'une croissance G_t^i imputable aux dynamiques intra-urbaines à chaque ville, tel que :

$$P_{t+1}^i = P_t^i \cdot (1 + r_t^i)$$

avec :

$$r_t^i = \gamma \cdot H_t^i + (1 - \gamma) \cdot G_t^i$$

Pour tester les améliorations du modèle SimpopNet, il serait très intéressant de l'appliquer à des situations réelles. En effet des bases de données sur l'évolution démographique

de systèmes de villes dans différents pays du monde sont déjà disponibles (BRETAGNOLLE, GUÉROIS et al., 2011). Par ailleurs des bases de données sur l'évolution des réseaux de transport à l'échelle nationale et sur le temps long sont en cours de constitution pour plusieurs pays du monde (THÉVENIN, 2010 ; MIMEUR, 2013 ; BRETAGNOLLE, 2009). Ces données permettront de constituer des situations initiales idéalement représentatives ou encore de définir des conditions réelles d'évolution de réseaux. Les sorties de simulation du modèle SimpopNet pourront ainsi être comparées avec une très grande précision aux évolutions réelles de systèmes de villes. Ces recherches pourraient contribuer à la mise en évidence de la boucle de coévolution entre réseau de transport et système de villes.

CONCLUSION

"Beard said he was a theoretical physicist. It always sounded like a lie. The sculptor paused, perhaps to rehearse mentally his English, then asked a surprising question. Senor Beard was to excuse an uneducated man's naivety and ignorance, but was the strange reality described by quantum mechanics a description of the actual world, or was it simply a system that happened to work? Infected by Malorcan's courtly style, Beard complimented him on the question. He could not have phrased it better himself, for there was no better interrogation of quantum theory than this."
Solar, Ian McEwan.

Des modèles de simulation de la dynamique des villes comme objets de recherche

La dynamique des villes est un sujet aussi complexe que passionnant. La connaissance fine des processus de la croissance urbaine motive nombre de chercheurs en géographie, en économie, en aménagement, mais également en physique et en biologie. Parmi toutes les approches pertinentes, ce travail s'inscrit dans une tradition originale, visant à analyser ces processus au niveau du système de villes, considérant ainsi que l'évolution de chaque ville est le résultat de multiples interactions à l'échelle interurbaine. Les systèmes de villes sont donc étudiés en tant qu'objet géographique à part entière et les savoirs sur leurs organisations et leurs évolutions se cumulent peu à peu. Pourtant, du fait de la difficulté à recueillir des données cohérentes dans le temps long sur l'évolution démographique urbaine (BRETAGNOLLE, GUÉROIS et al., 2011) ou sur l'évolution des richesses accumulées ou produites par les villes, les processus de croissance n'ont pas encore été mis à nu. Des théories tentent de combler ces lacunes et offrent des explications aux phénomènes observés.

Ce travail de thèse a pour enjeu d'interroger l'une d'entre-elles : la théorie évolutive urbaine (PUMAIN, 1997 ; PUMAIN, 2000 ; PUMAIN, 2009). Puisque les processus en jeu résultent d'interactions difficiles à mettre en évidence par les données disponibles, la simulation est apparue comme une démarche alternative, quasi expérimentale. La théorie évolutive urbaine peut-elle engendrer, si elle est simulée, des évolutions de systèmes urbains caractéristiques ? Cette première question en soulève une deuxième : quels sont les mécanismes, parmi ceux que la théorie suggère, essentiels à l'émergence de ces structures caractéristiques ?

Pour mener à bien ce projet, il a été nécessaire de confronter, par la simulation et de façon systématique, chaque processus explicité par la théorie avec les données disponibles et les connaissances actuelles. Il a d'abord été nécessaire de rassembler les savoirs accumulés sur la dynamique des systèmes de villes et d'en extraire les grandes caractéristiques. Celles-ci ont été synthétisées sous la forme de dix *faits stylisés* majeurs. Ensuite, il nous a fallu produire des modèles de simulation, véritables *transcriptions computationnelles* de la théorie urbaine, aptes à être testés et explorés au sein de protocoles d'expérimentation. Ces modèles de simulation sont devenus les objets de recherche de la thèse.

Une approche inter-disciplinaire

Au terme de ce travail de thèse et des quatre années nécessaires de formation à la recherche qu'il a représenté, considérons le chemin parcouru. Ni modélisatrice, ni vraiment géographe au commencement, nous sommes peu à peu devenue les deux grâce à une immersion inter-disciplinaire permanente. Deux impulsions initiales nous ont conduit vers le projet de recherche qui devait être le notre : le soutien assidu des géographes du laboratoire nous a éveillé aux questionnements géographiques, quand le concours inconditionnel des modélisateurs et des informaticiens nous a libéré de nos appréhensions de la maîtrise des langages informatiques. Puis, suite à une collaboration de longue date entre le laboratoire Géographie-Cités et l'Institut des Systèmes Complexes de Paris Île-de-France et sous l'impulsion du projet ERC GeoDiverCity, la constitution d'une équipe inter-disciplinaire a donné une dimension toute autre au projet de thèse, l'inscrivant alors au sein d'un programme bien plus large de *libération des pratiques de modélisation en géographie et en SHS* (BANOS, 2013). Collectivement nous avons contribué à faciliter le processus de modélisation pour et par les géographes grâce à l'élaboration de nouvelles méthodes et de nouveaux outils adaptés. Développés et appliqués dans le cadre de cette thèse, ces derniers ont permis de concevoir et explorer deux modèles de simulation qui offrent un regard nouveau sur les théories urbaines et les dynamiques des systèmes de villes.

Des méthodes et des outils de modélisations génériques et ré-utilisables

La démarche de modélisation entreprise dans cette thèse nécessitait la mise en œuvre de protocoles d’explorations systématiques aptes à évaluer les comportements des modèles produits. Les méthodes manquant, deux protocoles d’exploration innovants et efficaces ont alors été construits et éprouvés. Ils sont fondés sur le calcul intensif sur grille de calcul et sur l’optimisation des explorations grâce à l’utilisation d’algorithmes évolutionnaires. Le premier protocole, une méthode de calibrage automatisée, permet d’évaluer la *suffisance* des mécanismes implémentés en prouvant si le modèle est capable d’exhiber des comportements de simulation proches des comportements recherchés. Le deuxième, un protocole d’analyse de sensibilité (*the Exploration Profile algorithm*), permet de prouver la *nécessité* de chaque mécanisme en évaluant individuellement sa contribution aux comportements simulés.

Développés dans un souci de généricité pour garantir leur utilisation dans de nombreux autres contextes de modélisation, ces protocoles sont libres et accessibles, via la plateforme SimProcess (REY COYREHOURCQ, 2014) et le logiciel OpenMole²¹. Ces méthodes sont déjà en cours d’application sur d’autres modèles géographiques de simulation : un modèle d’évolution du système urbain post-sovietique (modèle MARIUS (COTTINEAU et CHAPRON, 2013)), un modèle de diffusion d’épidémie (modèle MicMac (BANOS, 2013 ; REY COYREHOURCQ, 2014)) et un modèle de diffusion des pièces d’euro (LE TEXIER, 2014).

Deux modèles de simulation pour l’étude de la dynamique des systèmes de peuplement

Les deux modèles SimpopLocal et SimpopNet ont été conçus pour interroger deux aspects différents, mis en avant par la théorie évolutive urbaine, du rôle des interactions interurbaines dans la croissance des villes. SimpopLocal permet de se focaliser sur l’*objet* de ces interactions en modélisant l’impact des innovations et de leur diffusion sur l’évolution du système de peuplement. SimpopNet permet de questionner le *support* de ces interactions en simulant les mécanismes d’une coévolution d’un système de villes et de son réseau de communication et en testant l’effet de l’évolution des vitesses de transport sur la croissance du système urbain.

Ces deux modèles ont été présentés, construits et détaillés suivant une grille commune et standardisée. Celle-ci oblige à expliciter d’une part les sources d’inspiration (sous la forme d’une modélographie), d’autre part les fondements théoriques du modèle, et enfin, l’ensemble des parti-pris de modélisation et les mécanismes implémentés (suivant le protocole de description ODD de GRIMM, BERGER, DEANGELIS et al. (2010)). Cette grille

21. <http://www.openmole.org/>

est suffisamment générique pour être applicable à tous les modèles de simulation et peut ainsi devenir un bon outil de communication.

SimpopLocal et SimpopNet sont des modèles de simulation hybrides, couplant de manière dynamique systèmes d'équations différentielles et formalisations à base de règles, processus macroscopiques et processus microscopiques, individus-centrés. Ce choix délibéré, guidé par la diversité des processus, des échelles et des niveaux pris en compte, a des répercussions importantes sur les méthodes de développement informatique ainsi que sur les outils de modélisations et d'exploration utilisables.

L'évaluation des mécanismes du modèle SimpopLocal, grâce aux deux protocoles d'exploration massive, et l'interprétation de deux expérimentations réalisées sur SimpopNet ont permis des avancées décisives dans la compréhension des dynamiques urbaines. Ces résultats ont montré que les deux modèles sont capables, dans leur parcimonie, de rendre compte de processus clés de la dynamique des villes, devenant ainsi de bons candidats à l'explication. En outre, ils donnent un retour encore inédit sur la théorie évolutive urbaine en prouvant, pour la première fois, la nécessité de l'implication de mécanismes d'interactions interurbaines dans la simulation pour produire des évolutions de système de peuplement proches des évolutions de systèmes réels.

De nombreuses pistes à explorer

Au moment de clore ce mémoire de thèse, nous réalisons l'ampleur du chantier que nous venons de mettre en place. Nous avons défriché plusieurs pistes de recherche, contribuant de la sorte à la consolidation des premières fondations d'un travail de recherche de longue haleine sur la modélisation des dynamiques urbaines. Loin d'avoir dit notre dernier mot, nous sommes impatiente de pouvoir continuer à bâtir, les fondations actuelles nous paraissent être suffisamment robustes pour supporter la construction d'au moins quatre projets de recherche.

Naturellement, les deux premiers projets concernent les modèles SimpoLocal et SimpoNet. Ces modèles ont vocation à être développés, explorés, appliqués et, espérons-le, appropriés par d'autres. Dans le cadre de l'ANR TransMondyn, des discussions ont déjà été engagées avec des archéologues pour l'application du modèle SimpopLocal à un cas concret. Par ailleurs, nous avons soulevé à la fin du cinquième chapitre plusieurs pistes de recherche pour le modèle SimpopNet, relatives au raffinement de certains mécanismes, mais aussi à son couplage avec des bases de données sur l'évolution des réseaux et des villes. De la même manière, cette dernière piste a déjà été envisagée avec des bases de données en cours de conception. Ces deux projets nous semblent tout aussi passionnants et nous serions bien en peine de devoir n'en choisir qu'un.

Le troisième projet serait celui de la conception de nouveaux modèles de dynamiques

urbaines. Il pourrait s'agir d'un modèle unificateur des modèles SimpopLocal et Simpop-Net qui simulerait la transition d'un régime de croissance à l'autre. Mais nous pourrions également envisager un dernier modèle, SimpopClim, qui simulerait un troisième régime de dynamique urbaine dont l'apparition serait suscitée par la prise de conscience sociale de la finitude des ressources mondiales qui viendrait perturber le régime urbain installé à la suite de la Révolution Industrielle. L'un des aspects essentiels de ce nouveau projet serait l'application de la théorie évolutive urbaine à ces nouvelles problématiques environnementales : quelles peuvent être les conséquences de la finitude des ressources sur la croissance générale et l'expansion des systèmes urbains si la croissance urbaine est justement considérée comme la conséquence d'une compétition interurbaine pour les ressources territoriales ? L'idée de ces deux modèles n'est pour le moment qu'une ébauche, mais elle paraît très attrayante.

Le dernier projet envisagé doit être mené de front avec au moins l'un des trois autres. Comme il nous est donné la chance de pouvoir continuer à participer au programme de recherche ERC GeoDiverCity pendant encore un an, nous continuerons à perfectionner les outils créés et à développer des méthodes et des outils pour la modélisation en géographie.

ANNEXES

Modélographie multi-agents de la simulation des interactions sociétés-environnement et de l'émergence des villes : Description de six modèles

A.1	Sugarscape	323
A.1.1	Référence	323
A.1.2	Contexte de recherche	323
A.1.3	Enjeux	323
A.1.4	Dynamiques simulées	323
A.1.5	Sorties de simulation et résultats	324
A.1.6	Conclusions et remarques	325
A.2	Artificial Anasazi	326
A.2.1	Référence	326
A.2.2	Contexte de recherche	326
A.2.3	Enjeux	326
A.2.4	Dynamiques simulées	327
A.2.5	Sorties de simulation et résultats	327
A.2.6	Conclusions et remarques	327
A.3	The Village Project	329
A.3.1	Référence	329

A.3.2	Contexte de recherche	329
A.3.3	Enjeux	329
A.3.4	Dynamiques simulées	330
A.3.5	Sorties de simulation et résultats	332
A.3.6	Conclusions et remarques	333
A.4	ENKIMDU	334
A.4.1	Références	334
A.4.2	Contexte de recherche	334
A.4.3	Enjeux	334
A.4.4	Dynamiques simulées	335
A.4.5	Sorties de simulation et résultats	336
A.4.6	Conclusions et remarques	336
A.5	SimPop	338
A.5.1	Références	338
A.5.2	Contexte de recherche	338
A.5.3	Enjeux	338
A.5.4	Dynamiques simulées	338
A.5.5	Sorties de simulation et résultats	340
A.5.6	Conclusions et remarques	341
A.6	La maximisation de l'interaction et l'observation d'une distribution des populations urbaines	343
A.6.1	Références	343
A.6.2	Contexte de recherche	343
A.6.3	Enjeux	343
A.6.4	Dynamiques simulées	344
A.6.5	Sorties de simulation et résultats	345
A.6.6	Conclusions et remarques	346

A.1 Sugarscape

A.1.1 Référence

(EPSTEIN et AXTELL, 1996)

A.1.2 Contexte de recherche

J.M. Epstein et R. Axtell décrivent dans cet ouvrage le modèle Sugarscape et une série d'expérimentations de modélisation qui explorent la question de l'émergence de l'économie. Cette notion, très peu explorée en économie traditionnelle, est beaucoup plus questionnée par l'économie évolutionnaire, notamment grâce aux modèles multi-agents. À partir d'un modèle épuré présenté dans le deuxième chapitre, les chapitres suivants décrivent et étudient des comportements qui sont ajoutés à ceux du premier modèle, complexifiant ainsi peu à peu la société simulée. Au fur et à mesure, le répertoire des comportements des agents grossit pour inclure le mouvement, la récolte de ressources, la reproduction sexuelle, le combat, la transmission de culture, l'échange, le commerce, l'héritage, le crédit, la pollution, la propagation de maladies et la résistance immunitaire.

A.1.3 Enjeux

Dans le deuxième chapitre du livre, Epstein et Axtell décrivent la version la plus simple du modèle Sugarscape, qui explore un processus conduisant à l'inégale distribution de la richesse dans une population, à partir de la simulation d'interactions agents - environnement. Sugarscape est un modèle de simulation multi-agents de sociétés artificielles qui fait évoluer une population hétérogène d'agents dans un environnement où du sucre, symbolisant la ressource, est produit de façon continue et spontanée mais suivant une répartition spatiale hétérogène. Au cours de la simulation, les agents explorent l'environnement, ramassent le sucre et constituent peu à peu des réserves. Du fait des inégalités de répartition spatiale du sucre et des caractéristiques des agents, une répartition inégale des richesses entre les agents se développe. Dans une deuxième version du modèle, l'ajout d'un mécanisme de reproduction sexuée et d'héritage renforce cette dynamique de répartition inégalitaire des richesses.

A.1.4 Dynamiques simulées

Le monde simulé de Sugarscape est constitué d'un paysage de cellules hétérogènes dans lesquelles "pousse" du sucre. La quantité maximale de sucre portée par chaque cellule est

prédéterminée à l'initialisation, entre 1 et 4. À chaque itération, les cellules produisent une unité de sucre, jusqu'à atteindre leur quantité maximale. Dans la configuration spatiale utilisée par les auteurs, le paysage ressemble à deux montagnes de sucre entourées de zones pauvres en ressources. L'hétérogénéité spatiale du paysage consiste donc en une alternance de zones arides et de zones fertiles.

À l'initialisation, les agents sont répartis de façon aléatoire parmi ces cellules. À chaque itération, ils scrutent les alentours selon la portée de leur vision (en nombre de cellules), se déplacent vers la cellule inoccupée la plus proche qui contient le plus de sucre, et collectent le sucre présent. Si la cellule sur laquelle ils se situent est déjà la plus avantageuse, ils restent sur place et collectent de nouveau le sucre qui y repousse. Les agents sont capables de construire des réserves de sucre. Ils doivent cependant consommer pour couvrir leurs besoins métaboliques, et donc perdent une certaine quantité de sucre à chaque itération. Un agent peut mourir de deux façons : s'il n'arrive pas à récolter suffisamment de sucre pour subvenir à ses besoins métaboliques ou s'il a dépassé une espérance de vie préétablie de façon aléatoire entre 60 et 100 itérations. Les agents forment une population hétérogène par la diversité des combinaisons des valeurs de trois de leurs attributs : l'espérance de vie (en nombre d'itérations), la portée de la vision (en nombre de cellules) et le métabolisme de chaque agent (en nombre d'unités de sucre consommées par itération).

Dans une deuxième version du modèle, la notion de reproduction sexuée est ajoutée de telle façon que les agents les moins bien adaptés à l'environnement aient une plus faible probabilité de se reproduire et que les descendants des agents les plus adaptés débutent leur vie avec des atouts biologiques et environnementaux hérités de leurs parents.

A.1.5 Sorties de simulation et résultats

Dans la première version du modèle, le système s'ordonne rapidement : les agents découvrent les zones de meilleure fertilité et finissent par n'évoluer que dans ces zones prospères. La répartition spatiale des zones de productivité sucrière conditionne la répartition spatiale des densités de population en fonction de l'accessibilité à la ressource. De plus, la taille de la population du système s'ajuste peu à peu au nombre d'agents que le paysage de sucre peut faire vivre. Les simulations illustrent donc la notion de capacité d'accueil : un environnement ne peut pas subvenir aux besoins d'une population infinie et les densités de population reflètent les capacités d'accueil de chaque zone.

Un autre phénomène intéressant émerge : à partir d'une distribution égalitaire de la richesse, la simulation évolue vers une distribution très inégalitaire, dans laquelle une minorité de la population possède une richesse très supérieure à la moyenne. Cette configuration résulte de l'inégalité de la répartition initiale des ressources, de l'inégalité des dispositions des agents et d'un effet de "path dependency" lors des processus d'accumu-

lation. Les agents chanceux à l'initialisation (parce qu'ils sont nés dans les zones les plus fertiles, qu'ils ont la vision la plus perçante ou le métabolisme le plus efficace) sont ceux qui accumulent le plus rapidement de la richesse. Ensuite, par effet d'accumulation, les riches deviennent encore plus riches, et les pauvres encore plus pauvres.

L'introduction du comportement sexué conduit à des vagues démographiques. Sans le comportement sexué, la population du système évolue vers un état stable où elle est globalement proportionnelle à la capacité d'accueil du paysage. Mais avec l'introduction de ce comportement, des cycles d'abondance de ressources et de famine se succèdent. Les agents les mieux adaptés accumulent les richesses et multiplient leur descendance, tant et si bien que la population du système augmente peu à peu au-dessus de la capacité d'accueil de l'environnement. Les ressources se font alors de plus en plus rares, déclenchant finalement une famine qui décime la population. La faible taille de population permettant à nouveau la régénération des ressources du paysage, un nouveau cycle faste démarre et ainsi de suite. Ce nouveau comportement accélère le développement des inégalités de répartition de la richesse.

A.1.6 Conclusions et remarques

Le livre, *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*, propose une démarche de modélisation efficace et méthodique qui systématise la recherche des structures macroscopiques émergentes au fur et à mesure des ajouts de mécanismes (de comportements individuels ou processus sociaux) avec les versions successives du modèle. Le modèle Sugarscape est peut-être un des modèles multi-agents les plus connus en sciences sociales et semble avoir inspiré de nombreux modèles ultérieurs. Il pose en effet les bases d'une réflexion sur les interactions hommes – environnement, en simulant l'impact de la capacité d'accueil du milieu naturel sur l'organisation spatiale des populations.

A.2 Artificial Anasazi

A.2.1 Référence

(GUMERMAN et al., 2003; AXTELL, EPSTEIN et al., 2002)

A.2.2 Contexte de recherche

Artificial Anasazi est un modèle de simulation développé au Santa Fe Institute et à la Brookings Institution au sein du programme *The Artificial Anasazi Project*, dirigé par G. Gumerman.

A.2.3 Enjeux

The Artificial Anasazi Project a pour but de comprendre la trajectoire démographique des Anasazis, une société amérindienne ayant vécu dans la Long House Valley, au sud-ouest des États-Unis, durant la préhistoire (200 – 1400 ap. J.C.). Ce projet utilise un modèle multi-agents pour simuler le développement d’une société artificielle constituée de ménages amérindiens dans un environnement évolutif, caractéristique de la zone et de l’époque. Les sorties de ces simulations sont ensuite comparées à des bases de données empiriques archéologiques et paléo-environnementales.

La Long House Valley est un terrain très favorable pour ce type de modélisation très descriptive. En effet, ce territoire naturellement délimité a été sujet à de nombreuses études paléo-environnementales ayant abouti à une reconstitution quantitative extrêmement précise des fluctuations du potentiel de production agricole (en kilo de maïs par hectare) année par année, depuis l’an 200 jusqu’à nos jours. Une documentation archéologique minutieuse sur une très longue période permet de connaître les comportements sociaux, économiques, religieux, et de localisation des habitants de la région depuis l’introduction de la culture du maïs vers 1800 av. J.C.. Les caractéristiques des agents (comme les coutumes de mariage, le nombre de descendants, ou les besoins nutritionnels) ont ainsi pu être précisément quantifiées. Ces banques de données colossales offrent donc une base très solide pour la validation empirique du modèle.

Le modèle se focalise sur deux questions essentielles :

- Quel est le rôle de l’environnement dans l’explication des dynamiques de localisation des établissements et des dynamiques démographiques (telles que la forte croissance démographique après 1000 et l’abandon total de la région vers 1300) ?
- Peut-on reproduire par la simulation les tailles et les dynamiques de fondation/abandon des établissements observés aux différents périodes ?

A.2.4 Dynamiques simulées

Il existe deux grands types de dynamiques dans le modèle : celles de l'environnement et celles des agents. Les dynamiques de l'environnement sont simulées grâce aux inputs des données environnementales à chaque itération (représentant une année) de la simulation : le potentiel de production de maïs de chaque parcelle est préétabli année par année d'après les recherches empiriques, utilisées telles quelles par le modèle. Cette reconstitution permet donc de recréer, dans la simulation, les dynamiques paysagères observées (les variations de potentiel de productivité agricole ou de capacité d'accueil) et d'y confronter les agents. Les agents représentent des ménages caractérisés par leur âge (à partir du moment de leur formation), leur taille (en nombre de personnes), leur consommation annuelle en maïs, leur capacité de réserve de maïs, leur localisation, et des indicateurs liés aux possibilités de mariage des femmes du ménage. Les règles d'interactions entre agents et avec l'environnement explicitent le comportement de choix de localisation de l'habitat et des champs cultivés par les agents. Une itération représente une année durant laquelle les agents cultivent leur parcelle. À la fin de cette période, les agents peuvent décider ou non de relocaliser soit leur habitat, soit leur parcelle de culture ou les deux, en fonction de leur capacité à couvrir leurs besoins nutritionnels cette année-là.

A.2.5 Sorties de simulation et résultats

La localisation simulée des habitats et des cultures est cartographiée année après année et comparée aux données. Les sorties de simulations (ou du moins les résultats de la seule simulation publiée) sont très proches des données d'observation. Les variations des potentiels de productivité agricole permettent donc d'expliquer pour beaucoup les variations démographiques connues par la société Anasazi. Cependant, une variation démographique particulière observée empiriquement, celle de l'abandon final de cette vallée après 1300 par les Anasazis, n'est pas reproduite par la simulation. Cette expérimentation permet donc d'apporter de nouvelles hypothèses dans les débats sur les causes de cet abandon : les causes environnementales n'expliquent pas tout et d'autres facteurs doivent être pris en compte (pression sociale, épidémie, manque démographique pour garder et entretenir les structures et organisations sociales développées, etc.).

A.2.6 Conclusions et remarques

Le modèle Anasazi est largement inspiré du modèle Sugarscape (dont les auteurs sont impliqués dans le projet Anasazi), et peut même en être considéré comme une application à une région très bien connue et documentée. La masse des données injectées dans le modèle le rend "réaliste", en ce qu'elle permet de comparer directement les sorties du modèle

avec des données réelles. Ce type de modèle "guidé par les données" (data-driven) comporte cependant le risque de ne guère apporter de contribution significative. C'est selon JANSSEN (2009) la principale faiblesse du modèle Anasazi. Cet auteur a en effet reproduit le modèle et est arrivé à la conclusion que les sorties de simulation (output) sont davantage dépendantes des données introduites dans la simulation (input) que des dynamiques internes au modèle. Ce travail certes confirme les résultats publiés mais surtout montre que le modèle apporte finalement peu à l'explication des phénomènes démographiques observés dans la Long House Valley. Le résultat le plus intéressant du modèle Anasazi était que les données environnementales ne permettent pas d'expliquer entièrement l'abandon de la vallée, mais l'analyse de M. Janssen montre que cette réussite est largement due à la qualité d'ajustement par le modèle des potentiels de production dans la vallée, les ajustements des variables qui déterminent les comportements sociaux des agents ayant beaucoup moins de poids sur les sorties de simulation. Le modèle agit plutôt comme une fonction de lissage des données d'entrée et les dynamiques simulées ne contribuent que trop faiblement aux sorties de simulations. Le fait que l'abandon de la vallée par les Anasazis ne puisse être expliqué par les seules raisons environnementales est démontré par le modèle mais aurait tout aussi bien pu être démontré – plus simplement – en calculant et comparant l'évolution de la capacité d'accueil de la vallée et celle de la démographie de la région.

Cependant, le modèle Anasazi a fait date, au moins en sciences humaines, car c'est la première application à un cas archéologique réel de la méthode de modélisation multi-agents. Ce modèle a de plus permis d'alimenter les débats sur des questions très discutées. Bien qu'il ne traite pas de l'agglomération des populations autour de centres urbains, il a inspiré d'autres modèles multi-agents archéologiques qui en traitent. On donnera ici les exemples des modèles Village et ENKIMDU.

A.3 The Village Project

Ce modèle par la suite appelé "Village"

A.3.1 Référence

(KOHLE, JOHNSON et al., 2007)

The Village Ecodynamics project :

A.3.2 Contexte de recherche

Le *Village Ecodynamics project*, dirigé par T. Kohler, G. Allen, M. Varian et Z. Kobti, a pour enjeu de comprendre l'évolution de l'environnement de la région Mesa Verde dans le sud-ouest du Colorado et la niche écologique que se sont construit les habitants cultivateurs de maïs y résidant. Le projet étudie donc la coévolution entre cette société d'agriculteurs et son environnement durant les 700 ans d'occupation continue de la région jusqu'en 1400 environ. Ce projet de long cours se construit autour de deux gros programmes complémentaires. D'un côté la constitution et l'exploration d'une base de données archéologiques très complète qui traite autant des évolutions de l'environnement que des dynamiques de peuplement de la région. Et d'un autre côté la construction d'un modèle multi-agent, reconstituant le plus fidèlement possible les données issues des traitements archéologiques pour permettre de raisonner sur les comportements de localisation des habitants dans la région et leur impact sur cet environnement.

A.3.3 Enjeux

L'enjeu de ce projet est d'expliquer les dynamiques démographiques, de localisation et d'aggrégation des foyers observés à partir de mécanismes simulant les comportements sociaux et leurs impacts sur la productivité de ressources dans l'environnement. L'hypothèse est que le déterminisme environnemental n'explique pas, à lui seul, l'organisation spatiale des sociétés fortement contraintes par leur environnement mais que les technologies, les pratiques et les organisations sociales contribuent tout autant à modifier cet environnement et donc les disponibilités en ressources. Les auteurs parlent de construction de niche environnementale (p. 61) : les humains ne font pas que s'adapter à un environnement donné mais modifient leurs technologies et pratiques pour s'adapter à un environnement qu'ils ont aidé à construire. On peut retrouver dans cette position l'idée de possibilisme tel que l'avaient proposé P. Vidal de la Blache et L. Febvre dans le vieux débat qui l'oppose au déterminisme physique.

Plus concrètement, les enjeux de ce projet sont de donner des réponses aux questions soulevées par l'exploitation des données archéologiques :

- Quels sont les moteurs des deux cycles de croissance et de dépeuplement des colonisations connus dans la région Mesa Verde ?
- Comment expliquer le mouvement général de la population depuis des hameaux vers des villages ou centres communautaires de plus en plus grands au cours de chaque cycle ?

D'après les auteurs, les données archéologiques suggèrent une corrélation positive entre les évolutions des tailles de regroupements de foyers (depuis des hameaux de quelques foyers à des centres communautaires de quelques dizaines de foyers) et la taille de la population totale, et que ce processus de regroupement est continu durant les deux périodes de colonisation. Ces regroupements semblent être corrélés à la croissance générale de la population mais ne sont pas bien corrélés avec les variations des ressources disponibles imputées aux changements climatiques. Les regroupements s'expliqueraient donc plutôt par des facteurs sociaux et historiques. Par ailleurs, les deux pics d'agrégation des populations sont apparus quand la population de la région avait déjà commencé à décroître, ce qui suggère que les centres d'agrégation ou centres communautaires exerçaient une "force d'attraction" sur les habitants. Les auteurs supposent que ces centres étaient donc plus résistants à la fission ou à l'abandon que les hameaux durant les premières phases de dépeuplement de la région.

Le modèle Village explore ces questions et interprétations en proposant des mécanismes pour la simulation des comportements des foyers de la région Mesa Verde et en simulant leurs impacts sur l'organisation de la société et leur environnement.

A.3.4 Dynamiques simulées

La construction de l'environnement simulé se fonde sur quatre grands types de modèles data-driven : celui du potentiel de production de maïs et celui de l'estimation de la disponibilité en eau, qui ont chacun une très fine granularité spatiale et temporelle ; celui de la dynamique de population de trois espèces de gibier en fonction de l'environnement dans lequel elles évoluent et finalement celui de la production de ressources en bois dans ce même environnement.

À chaque itération représentant une période d'un an, un agent (i.e. un ménage) doit trouver des ressources pour survivre : collecter bois et eau, cultiver du maïs et chasser. Si les besoins (en termes énergétiques) d'un agent ne sont pas remplis, il meurt. Les quantités de maïs produites sont fonction de la qualité des sols cultivés, de la taille des champs,

des conditions météorologiques de l'année et du taux d'utilisation historique des surfaces plantées (la dégradation des sols est donc modélisée). Les quantités d'eau disponibles fluctuent en fonction des conditions climatiques. Les quantités de bois disponibles dépendent de la nature du sol, de la quantité et de l'état des bois, et de la taille du stock de gibier présent sur la cellule (qui détériore les jeunes pousses). Les portions non-cultivées de l'environnement sont le support de croissance du gibier. Pour survivre, les ménages doivent garder une balance nette positive entre calories récoltées et consommées et, pour ce faire, doivent maintenir une forte production de maïs tout en maintenant le coût de collecte des autres ressources nécessaires le plus bas possible. En plus de gérer le nombre et la localisation des champs qu'il peut cultiver, un ménage a la possibilité de changer l'emplacement de son foyer, qu'il doit judicieusement choisir pour maximiser sa production de calories et minimiser les coûts de collecte des autres ressources. Il étudie pour cela les cellules non-cultivées qui sont à sa portée et fait des prédictions de récolte pour choisir la localisation optimale. L'organisation spatiale des habitats est la conséquence directe des décisions de localisation des agents.

Outre ces mécanismes de production et de collecte, les agents peuvent interagir socialement pour échanger leur surplus de calories. Ces échanges se matérialisent suivant trois types de réseaux. Un premier réseau simule les liens de parenté (grands-parents, parents et enfants des deux côtés de la famille) entre les individus des ménages. Ces échanges sont optimisés de telle sorte que les ménages peuvent apprendre à faire de meilleurs choix quand ils décident à qui demander de la nourriture via ce réseau : avec le temps, les agents apprennent à sélectionner les agents les plus coopératifs. Il en résulte que les ménages bien établis peuvent devenir des donateurs fiables et les ménages localisés dans des zones moins productives ou plus coûteuses deviennent dépendants du réseau social pour survivre. Un paramètre permet d'activer un comportement de relocalisation grâce auquel les ménages peuvent emménager près des ménages très productifs et donateurs. Avec le temps, les ménages se rapprochent et forment des noyaux autour des terres les plus productives, chaque noyau étant faiblement connecté avec d'autres par le réseau de parenté. Cependant, cette possibilité de choix de relocalisation n'est pas active dans les résultats de simulations rapportés dans la référence bibliographique utilisée. Un deuxième réseau, le réseau économique, retrace un historique des échanges économiques entre ménages avec traces des comptes et enregistrement des dettes. Une « réputation » est allouée à chaque ménage en fonction de sa productivité en calories et du montant des dettes contractées. Ces échanges économiques sont limités dans l'espace, la distance entre ménages augmentant le coût des échanges. Un troisième réseau d'échanges est simulé, le réseau des hubs (nœuds de très forte connectivité) qui émergent des deux réseaux précédents. Un ménage peut être promu au statut de « hub » s'il possède une bonne connectivité dans les deux autres réseaux et s'il est bien relié aux autres hubs, i.e. si ce ménage est central dans le réseau. Les hubs fournissent un meilleur accès aux réseaux, à la manière de ponts, et per-

mettent ainsi aux agents qui leur sont reliés de mieux visualiser le réseau pour localiser de potentiels partenaires d'échanges. Ces hubs sont d'une conceptualisation volontairement assez floue, mais représentent des ménages ou des lignées prospères ou à fort pouvoir d'influence dans des centres communautaires.

Un échange se produit quand un ménage a besoin de plus de ressources pour survivre que ce qu'il peut produire. Ce ménage tente alors de satisfaire ses besoins en contractant d'abord des dettes aux plus proches voisins de son réseau économique. Si cet apport n'est pas suffisant, il demande de l'aide auprès de ses parents. S'il est toujours déficitaire en ressources, alors il repasse par le réseau d'échanges économique et accroît la portée spatiale de sa demande. L'étendue possible de cette recherche est fonction de la rareté de la ressource.

A.3.5 Sorties de simulation et résultats

Beaucoup de paramètres régissent les besoins des ménages, l'impact de leurs comportements sur l'environnement et les règles des comportements d'échanges. Les effets des variations de ces paramètres sont mesurés par l'évolution de la population totale simulée, celle de la localisation de la population, l'efficacité des ménages (en fonction de la localisation choisie et des besoins à satisfaire), la taille et la localisation des regroupements de ménages, la durée ou la quantité de calories consommée pour chaque grand type d'activités (agriculture, chasse, collecte d'eau ou de matériaux de chauffe) etc. Chaque sortie de simulation est évaluée en fonction de sa capacité à reproduire les grandes caractéristiques d'évolutions déterminées par les données archéologiques.

Tout comme dans le modèle Anasazi, la localisation et la croissance des ménages simulées par le modèle s'expliquent en partie par les évolutions de la productivité de l'environnement de la région. Mais cette dynamique environnementale n'explique pas toutes les dynamiques de peuplement observées dans la région. L'intégration de comportements sociaux, notamment par l'introduction des échanges entre ménages, permet d'approfondir l'explication. En effet, le système résultant de la mise en place des échanges de calories via les réseaux sociaux est capable de soutenir une population totale bien plus grande que celle soutenue dans un système sans échanges entre ménages. L'introduction de comportements sociaux permet ainsi de minimiser les écarts entre les sorties de simulations et les données réelles. Cependant, un effet pervers apparaît avec la simulation de ces comportements : en période de rareté de la ressource, le total des échanges diminue et les conséquences pour le système de peuplement sont d'autant plus lourdes que la population, qui est devenue dépendante de ces ressources échangées, est grande. De même, l'interruption des échanges pour d'autres raisons comme par exemple le gel des interactions entre hubs durant les périodes d'hostilité intercommunautaire peut aussi causer, par un changement local dans

la répartition/distribution des ressources, des états de manques. Ainsi, les interruptions de réseaux d'échanges des ressources pourraient contribuer de façon importante à l'explication des deux phases de dépeuplement de la région.

A.3.6 Conclusions et remarques

Contrairement à ce que l'introduction du chapitre laissait attendre, la discussion autour de la formation d'agréats de ménages de plus ou moins grande taille est très courte. L'exploration de ce processus semble encore un enjeu de taille pour le projet. Mais le modèle Village fait un grand pas en avant, à la suite du modèle Anasazi, dans l'explication des dynamiques de peuplement et de localisation des sociétés anciennes. Comme les dynamiques environnementales ne peuvent tout expliquer, des hypothèses de comportements sociaux sont testées. Les hypothèses simulées d'échanges entre les ménages et les règles de localisation qui en résultent donnent de bons résultats, ce qui ouvre la voie à l'exploration d'un grand champ de modélisation : l'introduction de comportements sociaux dans des modèles de localisation de ménages évoluant dans des environnements aux caractéristiques dynamiques. Dans ce projet, l'introduction de comportements sociaux semble se faire petit à petit, à l'image de la méthode de modélisation proposée par le modèle Sugarscape.

Cependant, la réunion et l'imbrication de nombreux sous-modèles (dynamique de population de gibier, modèle hydrologique, modèle de croissance de population, modèle de choix de localisation et modèle de comportements sociaux) rend ces types de modèles détaillés très complexes. Plus le nombre de paramètres est grand, plus l'espace des comportements possibles du modèle est vaste et plus la validation de ces modèles, ou du moins de certains résultats, est difficile (FAGIOLO, MONETA et WINDRUM, 2007). Les auteurs fondent une de leurs conclusions sur une expérimentation comportant seize simulations (KOHLE, JOHNSON et al., 2007, p.102), ce qui peut sembler un nombre trop faible au vu de la complexité des comportements possibles du modèle. Cette remarque montre toute la difficulté du travail de modélisation entre l'exigence pour un modèle d'être suffisamment descriptif pour produire de nouvelles connaissances sur le système étudié, et le besoin de sa fiabilité (sa validation).

A.4 ENKIMDU

A.4.1 Références

(WILKINSON et al., 2007)

The MASS project: <http://oi.uchicago.edu/~ñOI/ñPROJ/ñMASS/ñintroduction.htm>

A.4.2 Contexte de recherche

41The MASS project, porté par T.J. Wilkinson, J. Christiansen, et M. Widell de l'Université de Chicago, a pour but de reconstruire le paysage socio-environnemental de la Mésopotamie de l'Âge de Bronze par la simulation. D'après les auteurs, deux types d'hypothèses sont traditionnellement avancées pour expliquer les changements que subissent les sociétés : celles qui mettent en valeur les processus sociaux et celles qui, au contraire, valorisent les processus environnementaux. Avec le MASS project, les auteurs se détachent de ces positions traditionnelles, en adoptant une position médiane qui se focalise sur l'interface homme-environnement et les interactions qui en résultent. Les premières sociétés urbaines du Proche-Orient sont idéales pour étudier cette interface. Grâce aux nombreuses données issues des fouilles archéologiques et des textes anciens, il est possible de définir le contexte social, économique et environnemental de la région sur plusieurs millénaires. Ils ont donc engagé un projet de modélisation pour expliquer les trajectoires de développement ou de récession des systèmes de peuplement de l'Âge de Bronze dans différentes régions climatiques de la Syrie et de l'Irak.

A.4.3 Enjeux

La construction du modèle à base d'agents ENKIMDU est détaillée dans l'article cité. Il est conçu pour explorer les trajectoires possibles d'une société urbaine émergente confrontée à des perturbations climatiques et des variations aléatoires de disponibilité en ressources d'une année sur l'autre. Comme dans le modèle Village, une boucle de rétroaction entre environnement et société est spécifiée en modélisant de façon très détaillée à la fois les évolutions environnementales au cours du temps mais aussi les comportements des individus et leur impact sur le système. Le projet a pour but d'examiner comment réagissent des sociétés humaines à des périodes de stress dues à des événements ponctuels ou répétitifs (sécheresses, catastrophes naturelles ou périodes d'intenses conflits) tout en explorant comment des dynamiques internes au système peuvent influencer les trajectoires démographiques de long terme.

A.4.4 Dynamiques simulées

Le modèle ENKIMDU est conçu comme un modèle générique pour représenter des dynamiques complexes d'interaction homme-environnement sur de larges échelles spatiales et temporelles. Il peut être spécifié pour s'appliquer à une région ou à des scénarios alternatifs. Il est composé de cinq sous-modèles couplés grâce à l'architecture de simulation *Argonne's Dynamic Information Architecture System* (DIAS) : un modèle qui simule les dynamiques météorologiques, un modèle agronomique (hydrologie et dynamique des sols, température et évaporation de surface, croissance de végétaux, cycle de nutriments, etc.), un modèle de gestion de troupeaux (dynamique de population et de comportement d'alimentation), un modèle de dynamique démographique des sociétés humaines et finalement un modèle de comportement individuel (pratiques agricoles, mariage, héritage, échange et commerce, évolution de la structure des ménages, mécanismes de réponse au stress, etc.). Ce modèle simule des processus naturels et des processus sociaux au jour le jour, sur des durées de simulations pouvant atteindre plusieurs décennies. Ces processus sont modélisés aux échelles très fines de l'individu ou du ménage, du champ de cultures ou du troupeau. Les mécanismes d'interaction homme-environnement sont extrêmement détaillés dans le modèle, comme le montrent les exemples suivants, tirés des explications données par les auteurs :

- *La substituabilité des sources d'énergie* : Quand la quantité de bois disponible correspond aux besoins des communautés, les déjections animales sont utilisées comme fertilisant. Mais quand le bois manque, ces déjections sont utilisées comme énergie de chauffe et leurs cendres épandues comme fertilisants. Avec la croissance des populations, ces deux utilisations entrent en compétition.
- *L'effet de la récolte partielle d'un champ* : Un ménage moissonne seulement une portion d'un champ en une journée. En conséquence, la biomasse de culture sur le champ est réduite et la surface de terre apparente est augmentée. Cela conduit à des changements dans le profil de température des sols, les taux d'évapotranspiration, la trajectoire de croissance du reste de la culture.... Par rétroaction, les changements d'état des cultures qui en résultent vont influencer les décisions et les comportements du foyer les cultivant.
- *L'impact de la localisation des pâturages sur la dynamique des sols* : Lorsqu'un troupeau est amené à un pâturage, une partie du fourrage poussant sur place est consommée mais de précieux fertilisants y sont aussi déposés. Les effets de cette opération pastorale sont modélisés par des altérations ou améliorations locales des sols et de la végétation, effets qui sont ensuite pris en compte par les individus dans leurs prochaines décisions.

Ce modèle a été appliqué à une région semi-aride du nord de la Syrie et de la Turquie durant l'Âge de Bronze en se focalisant sur une ville et son hinterland : Tell Beydar en Syrie. Il pourra ensuite être mis à l'échelle en définissant et simulant les relations avec d'autres régions urbaines.

A.4.5 Sorties de simulation et résultats

Les données de sorties sont multiples. Elles concernent aussi bien les ménages (évolution de leur nombre au cours du temps), les récoltes (production et rendement au cours du temps), les troupeaux (taille et nombre au cours du temps), que des données d'ordre économique (taux d'échange, de prêts et de ventes de ressources entre ménages ou encore le taux de ménages ayant accès aux cultures). Trois scénarios sont présentés, traduisant différentes conditions climatiques et organisations sociales.

Le modèle générique ENKIMDU est en cours de construction et, de ce fait, les résultats présentés sont issus de simulations dont tous les mécanismes sociaux et environnementaux ne sont pas aussi détaillés que les auteurs pourraient le souhaiter. Sans pour autant apporter des réponses définitives, les résultats présentés dans l'article montrent quels types de questions le modèle est conçu pour explorer. Certaines données de sorties sont bien différentes des valeurs estimées, ce qui amène les auteurs à penser que tant que le modèle ne sera pas complet, c'est-à-dire suffisamment détaillé en termes de mécanismes simulés, ces résultats de simulations ne seront que des baromètres de l'état et de la santé de la société simulée plutôt que de véritables estimations (p. 66). Toutefois ces simulations leur ont permis de mettre en évidence que les sociétés complexes étaient capables d'une grande capacité d'adaptation aux variations de conditions socio-environnementales. Cela, grâce à la multiplicité des comportements individuels simulés (échanges, prise de décisions face aux crises, etc.) qui permettent d'absorber les fortes amplitudes de variation des conditions socio-environnementales (forte sécheresse par exemple) et d'en minimiser les conséquences sociales (faible amplitude des variations de population). Les auteurs mettent néanmoins en garde contre la circularité des explications : l'incorporation d'un facteur dans le modèle influe nécessairement sur les mécanismes et sur les sorties de simulations ...et donc sur les interprétations !

A.4.6 Conclusions et remarques

Ce projet traite des questions de croissance et de décadence de centres urbains. Bien que cela ne soit pas clairement explicité, le modèle s'attache surtout à l'évolution de la taille démographique et de l'emprise spatiale du noyau urbain modélisé, sans expliciter les mécanismes qui pourraient amener à l'émergence de telles structures spatiales. De ce

fait, il se place en aval des projets Village, SimPop et Émergence de centres urbains qui sont eux conçus pour modéliser l'émergence de ces organisations spatiales.

Le modèle générique ENKIMDU est un modèle aux mécanismes d'interactions homme-environnement extrêmement détaillés. Toutefois les résultats obtenus sont éloignés des estimations et le degré d'interprétation de ces résultats n'a pas la même finesse que la granularité de la modélisation proposée. Ce constat peut conduire à mettre en doute le besoin d'une modélisation aussi poussée qui ne sert pas, au moins pour le moment, à la compréhension des processus sociaux en jeu et qui, au contraire, comporte des risques. Ces modélisations très descriptives soulèvent la question de la représentativité des comportements : la simulation de l'exhaustivité des comportements possibles à cette échelle de granularité étant matériellement impossible (tout du moins pour le moment, au vu des ressources techniques disponibles), pourquoi modéliser un comportement plutôt qu'un autre ? De ce questionnement découle le danger de la circularité de l'explication, souligné par les auteurs, qui lie interprétation et compréhension des processus étudiés aux choix de modélisation. On peut pousser le raisonnement jusqu'à se demander si ce type de modèles, le plus descriptif possible, ne met pas en question le but même de leur conception, de la même façon qu'une cartographie à l'échelle 1 :1 remettrait en cause le besoin d'une carte ... Pourtant, ces travaux font réfléchir sur les potentialités de modèles aux mécanismes extrêmement détaillés. Sera-t-il possible de modéliser les comportements sociaux et leurs interactions avec l'environnement avec assez de finesse pour utiliser les résultats à titre prédictif ?

A.5 SimPop

A.5.1 Références

(BURA et al., 1996 ; SANDERS et al., 1997)

A.5.2 Contexte de recherche

Le modèle SimPop est né dans les années 90 de la collaboration entre des géographes de l'UMR Géographie-Cités et des informaticiens du laboratoire LAFORIA (Paris 6) qui voulaient appliquer le paradigme de la modélisation multi-agents à l'étude de l'évolution des systèmes de peuplement dans le temps long. Il est devenu le premier modèle multi-agents construit en géographie. Une famille de modèles s'est ensuite constituée autour du même paradigme de modélisation géographique : <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr>.

A.5.3 Enjeux

L'enjeu de ce projet était d'élaborer un modèle dynamique pour simuler le passage d'un peuplement distribué en villages à un système de villes hiérarchisé. Ce but impliquait de mettre en évidence les paramètres qui rendaient compte de la concentration progressive de la population dans des entités géographiques de plus en plus grandes et aux profils économiques de plus en plus diversifiés. Le modèle devait reproduire la lente émergence et la persistance d'une très forte différenciation des villes par leur taille, l'organisation hiérarchique étant la propriété majeure des systèmes de peuplement urbains, mais aussi intégrer le processus plus ou moins continu de différenciation des unités urbaines en fonction de la division du travail.

A.5.4 Dynamiques simulées

Le territoire est formé d'une grille d'hexagones ou unités géographiques, chacune représentant un lieu potentiel de peuplement. Certaines de ces unités sont cependant désignées comme inaptées à la colonisation (haute montagne ou mer par exemple). Chacune de ces unités est dotée d'un "capital" ou potentiel de ressources naturelles, qui représente la capacité maximale de ressources naturelles disponibles pouvant être mise en valeur par des activités agricoles lorsqu'un peuplement est établi dans le lieu. Le capital de production agricole maximale est fixe durant toute la simulation mais les rendements évoluent au cours du temps pour tenir compte des innovations techniques (ces augmentations de rendements sont des inputs au modèle). Le semis de peuplement initial est défini en dotant

chaque unité géographique d'une certaine population grâce à un tirage aléatoire dans une loi normale (de moyenne : 180, et d'écart-type : 50). Les unités géographiques peuplées sont des agents "ville".

Au cours de la simulation, chaque lieu (ou agent "ville") peut ensuite croître en fonction de sa réussite sur les marchés d'échanges des biens produits et des fonctions économiques acquises au cours de la simulation. Les fonctions économiques déterminent l'ensemble des moyens de production qui vont permettre aux centres de peuplement de croître et de s'enrichir. Il existe quatre types de fonction : agricole, commerciale (avec quatre niveaux), administrative (avec deux niveaux) et industrielle (en deux sous-types : extraction ou transformation). Ces fonctions s'organisent de manière hiérarchique selon les conditions d'acquisition requises, les niveaux de productivité et la portée spatiale des activités économiques. Chaque nouvelle fonction est acquise selon des règles propres qui comportent des critères de taille et de richesse du centre de peuplement. À l'initialisation, chaque lieu peuplé est un village dans lequel toute la population est affectée à la fonction de production agricole. Au fur et à mesure de la croissance, de l'enrichissement et de l'acquisition de nouvelles fonctions économiques par ce village, celui-ci peut devenir une "ville" dont la population grandissante se répartit dans les différentes fonctions de production acquises.

À chaque itération modélisant une période de dix ans, les centres de peuplement produisent une certaine quantité de produits alimentaires mais en consomment aussi une partie pour satisfaire à leurs besoins. Si la production d'un centre de peuplement dépasse sa demande, c'est-à-dire les quantités requises pour satisfaire aux besoins de sa population, le surplus est proposé et vendu aux autres lieux. Si la quantité produite n'est pas suffisante, le centre de peuplement en pénurie devra faire appel aux surplus des autres centres à sa portée. Ce mécanisme s'applique de la même façon à toutes les autres fonctions commerciales et industrielles. Des marchés d'échange se mettent alors en place entre les centres de peuplement, selon des réseaux définis par la portée d'échange associée aux fonctions acquises par les centres de peuplement. Chaque échange donne lieu à un transfert de richesse, en fonction du prix des biens échangés. Ensuite, les évolutions démographiques de chaque centre de peuplement sont calculées. Le taux de variation de la population est évalué selon le bilan des échanges ayant eu lieu pendant l'itération pour l'ensemble des fonctions du centre de peuplement. Si la production de biens alimentaires est insuffisante, la croissance de la population est menacée. Mais les capacités locales de production peuvent être dépassées grâce à l'acquisition d'autres fonctions augmentant l'aire d'influence et la richesse de chaque lieu. L'enrichissement joue aussi sur la croissance : le taux de variation de la population d'une ville est accru proportionnellement à son enrichissement pendant l'itération considérée. Finalement, les taux de variation des unités de peuplement qui ne possèdent que la fonction agricole sont fonction de leur localisation : un village proche d'une ville aura une plus grande probabilité de voir sa population décroître en raison du pouvoir attractif de la ville, au contraire d'un village

éloigné d'une plus grande ville. À la fin de chaque itération et après le calcul de croissance de population, l'acquisition ou la perte de fonction de production est établie en fonction de la taille de la population et de la richesse des centres de peuplement.

A.5.5 Sorties de simulation et résultats

Les principales sorties sont définies à l'échelle du système macrogéographique. Ainsi, l'organisation hiérarchique (résumée par la distribution Rang-taille) et sa structure spatiale (en comparaison avec la théorie des lieux centraux), la diversité fonctionnelle des villes et la stabilité de ces caractéristiques sont étudiées. La cohérence des résultats est ensuite vérifiée par l'adéquation entre la trajectoire de développement suivie par le système simulé et les faits stylisés de l'évolution des systèmes de villes établis par la théorie urbaine (constituée à partir de l'assimilation de nombreuses données empiriques). Ainsi, il est nécessaire pour la validation du modèle que celui-ci soit capable de reproduire à la fois la forme de la distribution statistique de la population, une organisation de l'espace tendant à espacer les plus grandes villes du système, et enfin un processus d'agglomération et de concentration de la population dans les centres urbains au cours du temps. Ce modèle produit des simulations qui montrent une organisation progressive de l'urbanisation du système qui se traduit par :

- une augmentation progressive (de forme exponentielle) de la population totale du système au cours de la simulation,
- une distribution Rang-Taille des lieux de peuplement qui se hiérarchise peu à peu,
- une diversification progressive des fonctions urbaines des plus grandes unités de peuplement,
- une organisation spatiale rappelant la théorie des lieux centraux (l'espacement entre deux lieux de même niveau de fonction est d'autant plus important que ce niveau est élevé ; avec la banalisation et la diffusion de cette fonction, ces distances tendent à diminuer progressivement).

Les auteurs concluent que l'ensemble de leurs simulations montre clairement le rôle fondamental de trois composantes pour obtenir un système de peuplement qui se développe, se hiérarchise et se complexifie progressivement en accord avec les théories urbaines :

- l'existence, par les marchés d'échanges, d'interactions entre les lieux (il ne se construit pas de hiérarchie urbaine s'il n'y a pas d'échange, de concurrence entre les villes) ;
- l'apparition exogène continue de nouvelles fonctions (sinon le système dégénère, il perd sa structure hiérarchique) ;

- des mécanismes stochastiques (même des dotations initiales identiques peuvent laisser le système évoluer vers une différenciation et une hiérarchisation, dès lors que des échanges sont établis et qu'un certain aléa crée des variations dans l'évolution de la population et de la richesse de lieux résultant du bilan de leurs échanges).

Sans l'un de ces trois processus, le système perd ses élans de croissance et dévie des trajectoires de croissance, de hiérarchisation et de complexification que l'on connaît des systèmes urbains.

A.5.6 Conclusions et remarques

Dans la théorie urbaine sur laquelle le modèle est fondé, les interactions homme-environnement ne sont pas au cœur du problème et la théorie proposée ne se limite pas au simple mécanisme de la contrainte environnementale locale. Dans le modèle SimPop, si un peuplement arrive à dégager suffisamment de surplus, il peut alors progressivement s'abstraire des contraintes locales qui brident sa croissance grâce à l'acquisition de nouvelles fonction urbaines qui étendent son aire d'influence. La nécessité de la production de richesse en surplus des besoins locaux est la seule contrainte à la croissance. Le surplus de production agricole (i.e. dépendant de l'environnement) est un préalable *sine qua non* au développement des villes, et leur développement ultérieur est subordonné à l'acquisition de nouvelles fonctions urbaines. La contrainte environnementale première et sa distribution sur le territoire ont donc un fort impact sur le devenir du système. Par ailleurs SimPop traite de façon originale l'émergence de l'urbanisation. Alors que le modèle Village s'intéresse au processus d'apparition et de localisation d'agrégation spatiale de population, dans SimPop la localisation des possibles futurs centres urbains est fixe, et c'est l'émergence de la répartition et l'organisation spatiale des tailles de ces centres urbains qui est étudiée en la comparant à ce que prévoit la théorie des lieux centraux.

Le modèle SimPop se différencie des autres modèles présentés par son approche de modélisation. Une première originalité réside dans le choix des entités élémentaires modélisées. Dans SimPop, les agents sont des entités collectives complexes, ils représentent des villages ou des villes et non pas des individus ou des ménages comme dans les autres modèles. Ensuite, plutôt que de s'appuyer directement sur des données empiriques ou des mécanismes inventés, les mécanismes simulés sont conçus pour reproduire des faits stylisés tirés de la théorie urbaine. La validation du modèle ne passe donc plus par l'adéquation des simulations avec des données empiriques mais par la capacité du modèle à reproduire les ordres de grandeur et les grandes tendances de trajectoire des systèmes urbains. Cependant le modèle SimPop est partiellement guidé par l'introduction tout au long de la simulation de règles exogènes qui contrôlent la trajectoire globale du système simulé. Dans quelle mesure peut-on affirmer que l'organisation et la hiérarchisation du système simulé

émerge autant des interactions interurbaines et que de l'introduction régulière de certains événements exogènes (introduction de nouvelles fonctions urbaines à des moments clés de la simulation par exemple) ?

A.6 La maximisation de l'interaction et l'observation d'une distribution des populations urbaines

Ce modèle par la suite appelé "Émergence de centres urbains"

A.6.1 Références

(OUREDNIK et DESSEMONTET, 2007 ; OUREDNIK, 2010)

http://ourednik.info/urbanization_mc/

A.6.2 Contexte de recherche

Ce modèle présenté à l'ECTQG 2007 figure aussi comme modèle d'étude de la thèse de A.Ourednik.

A.6.3 Enjeux

Ce travail de modélisation débute par une réflexion sur les processus d'émergence de l'urbanisation et des facteurs qui la provoquent : Pourquoi des villes ? Pourquoi pas une seule ville ? Le raisonnement à l'origine des choix des mécanismes modélisés est le suivant : la ville est une structure avantageuse à la fois économiquement et spatialement car elle permet de maximiser les interactions possibles entre individus ; mais cet avantage n'existe que pour des interactions entre des individus ne produisant pas le même type de services. Dans le cas d'une société sans spécialisation des tâches ou division du travail, la concentration semble peu profitable ; lorsque la société est plus complexe, l'intensification des interactions qu'offre la concentration des peuplements augmente l'efficacité de l'utilisation des capacités humaines (division du travail, économie d'échelle, etc.) et des ressources locales (agriculture). Par ailleurs, l'émergence plurielle de l'urbanisation en différentes villes éloignées est due à une limite structurelle de la croissance urbaine du fait des contraintes environnementales qui freinent les interactions à distance. L'interaction la plus sensible à ces frictions de la distance est celle qui relie les producteurs de ressources et les urbains spécialisés. Pour vérifier ces hypothèses, un modèle multi-agents est proposé. Il simule l'émergence d'un phénomène de concentration/dispersion spatiale des populations en modélisant les comportements individuels de deux types d'agents : producteurs de ressources et spécialistes urbains.

A.6.4 Dynamiques simulées

Deux prototypes du modèle ont été construits, nous discuterons ici uniquement la seconde version du modèle. Dans cette version, deux types d'agents sont simulés :

- *les producteurs* : ces agents produisent les ressources nécessaires à la survie de tous les agents. Ils ont intérêt à la dispersion, à l'occupation du plus grand espace cultivable possible pour augmenter leur capacité de production. Ils n'ont pas d'avantages à la concentration mais ont cependant un avantage à être en contact avec des spécialistes urbains dont les connaissances permettent d'améliorer les capacités de production des champs. Ils sont ainsi stimulés par la proximité des centres urbains.
- *les spécialistes urbains* : ils sont localisés dans les centres urbains car ils sont directement concernés par les avantages de la concentration (partages de ressources, partage des connaissances, marchés centraux). Ils dépendent des producteurs pour leur besoins alimentaires mais en retour permettent d'augmenter les capacités de production par leurs connaissances et innovations.

L'environnement simulé est partagé entre :

- *les centres urbains* : ils sont caractérisés par le nombre d'agents spécialistes urbains s'y localisant et une portée, identique pour tous les centres urbains, qui représente la distance maximale de transport pour l'importation des productions depuis les champs vers les centres.
- *les champs de ressources* : ils sont caractérisés par une capacité maximale de production et un taux de renouvellement des ressources par itération. Ce taux de « repousse » représente la productivité des agents producteurs et est une fonction du nombre d'agents spécialistes urbains qui se trouve dans la portée du champ étudié (même portée que précédemment).

La dynamique du modèle suit le schéma suivant : dans les conditions initiales, l'espace est entièrement agricole et n'est peuplé que d'agents de type producteur. À chaque itération, la production de chaque parcelle est calculée en fonction de la productivité des agents producteurs et de l'influence des agents spécialistes urbains s'ils sont présents dans la portée. Si la production peut nourrir tous les agents producteurs et qu'il existe même un surplus, alors de nouveaux agents sont créés (3% d'agents spécialistes urbains et 97% d'agents producteurs) en fonction des quantités de ressources en surplus ; sinon les agents producteurs non-alimentés meurent. Les centres urbains sont ensuite approvisionnés : si la quantité disponible de ressources dans la portée de chacun est suffisante, aucun agent spécialiste ne meurt et une partie de ces agents se relocalisent dans des centres urbains

plus grands s'ils existent, ou fondent une nouvelle ville ; si les ressources disponibles pour les centres urbains ne sont pas suffisantes, une partie de la population urbaine meurt et le reste d'insatisfaits déménage dans une ville qui n'a pas connu d'insuffisance si elle existe, ou, si toutes les villes ont été en pénurie, les populations rescapées fondent une nouvelle ville.

Ainsi, dans la dynamique de ce modèle, les agents naissent et meurent en fonction des ressources disponibles qui dépendent elles-mêmes de la force des interactions entre les deux types d'agents modélisés. Et de ces dynamiques émergent ou disparaissent les centres urbains, matérialisation des concentrations de population.

A.6.5 Sorties de simulation et résultats

Les sorties de simulations comprennent l'émergence des centres urbains, leur nombre, taille, stabilité, et les variations de la proportion d'agents producteurs et d'agents spécialistes dans la population globale du système.

L'état final du système simulé dépend fortement des valeurs des trois paramètres du modèle (taux de productivité des champs, portée des échanges entre centres urbains et campagnes productrices, force de l'influence des agents spécialistes sur les rendements) qui induisent une grande diversité de situations finales. Quatre cas sont détaillés :

- un cas de bon rendement des champs et une grande portée des centres urbains : la population totale du système est grande, le système est plutôt stable avec 30% de population urbaine contenue dans environ 3 centres urbains.
- un cas de bon rendement des champs et une petite portée des centres urbains : la population totale du système est grande, le nombre et la localisation des centres urbains est stable avec environ 25 à 30 centres contenant 2% de la population totale, mais la taille démographique de ces centres est très instable.
- un cas de mauvais rendement des champs, une portée moyenne et une faible influence des spécialistes : le nombre et la localisation des centres urbains est stable avec environ 5 à 10 centres contenant 15% de la population totale, mais la taille démographique de ces centres est très instable.
- un cas de sols arides, une portée moyenne et une forte influence des spécialistes : le système est très instable et chaotique, pouvant amener à la disparition des agents du système ; la société simulée est incapable de survivre sans spécialistes urbains, et la taille des centres urbains est très petite.

A.6.6 Conclusions et remarques

Grâce à des mécanismes simples, ce modèle permet de raisonner sur l'émergence de comportements d'agglomération autour de centres urbains dans un contexte de fortes contraintes environnementales. Les indicateurs des sorties de simulations sont très pertinents pour notre problématique : l'émergence de villes (et leur nombre), la taille et la distribution hiérarchique de ces villes, la proportion de population urbaine et la taille démographique du système. Le modèle combine les deux approches de modélisation développées dans Village et SimPop en amenant à s'interroger à la fois sur les processus d'agrégation de population, la distribution spatiale de ces agrégats et sa cohérence au niveau du système.

Les auteurs concluent que leur modèle permet de comprendre pourquoi les populations urbaines ne se concentrent pas dans un unique centre, malgré l'avantage que cela représente pour la maximisation des interactions, et qu'un grand nombre de scénarios de l'urbanisation peuvent être simulés grâce à la variation des trois paramètres. Ces conclusions paraissent un peu hâtives au regard des fondements théoriques introduits dans le modèle. Pour aboutir à ce type de conclusion, le modèle mériterait d'être complété pour incorporer des mécanismes capables de générer des sorties de simulation plus représentatives des systèmes observables. Finalement, cette deuxième version du modèle apparaît comme une étape dans un grand processus itératif de complexification de modèle, analogue à celui développé pour le modèle Sugarscape.

The Exploration Profile (EP) algorithm

B.1	Introduction	348
B.2	Description of the algorithm	349
B.3	Validity	350
B.4	Heuristic improvement	351

Remarque importante

Cette annexe est tirée d'un article, écrit avec 3 autres auteurs : Romain Reuillon, Richardo De Aldema et Jean-Baptiste Mouret, soumis à la revue JASSS et actuellement en cours d'évaluation. Elle contient la description détaillée mathématique de l'algorithme des profils de calibrage. Je n'ai participé ni à son implémentation informatique, ni à son écriture mathématique, mais j'ai quand même tenu à retranscrire ici sa description, pour la mettre à disposition des lecteurs dans l'attente de la publication de l'article.

B.1 Introduction

The EP method relies on standard evolutionary algorithms for optimization, to provide a thorough analysis of the role played by each parameter. Such analysis is independent from one parameter to the other. A function that evaluates the performance of each particular model is supposed to be given (typically such evaluation may take into account the fitting of the model to the data).

Let $\mathcal{M}$ be the set of possible models under consideration and let $A = A_1 \times \dots \times A_n \subseteq \mathbb{R}^n$ be the domain of the parameter vectors that we consider as determining the models, where n is the number of parameters. We denote by $\mu : A \rightarrow \mathcal{M}$ the map that provides a model for a given parameter vector. Such map can be viewed as a meta-model, that is a model with free parameters.

Let $\tilde{f} : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ be the function providing an evaluation for each model. We can obviously evaluate a parameter vector with the function $f = \tilde{f} \circ \mu : A \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$. In this context, if we use the word *solution* we just mean a parameter vector $\bar{a} \in A$. By convention we suppose that best solutions are closer to 0.

To estimate the impact of the k -th parameter on the model, we consider the function $h_k : A_k \rightarrow \mathbb{R}$ defined by

$$h_k(x) = \inf \{ f(a_1 \dots, a_{k-1}, x, a_{k+1}, \dots, a_n) : a_j \in A_j \}.$$

This function produces, for a fixed value of the k -th parameter (i.e. $a_k = x$), the best possible performance of the model. In our view, this function is a good indicator of the impact of a parameter and provides valuable information for further analysis.

Our aim is then to compute, for each $k \in \{1, \dots, n\}$, a good approximation of h_k . A naive approach would consist in sampling A_k , say by choosing $\{a_k^1, \dots, a_k^{l_k}\} \subset A_k$, and running one optimization algorithm for each a_k^j to approximate $h_k(a_k^j)$. Unfortunately this method is very inefficient. To overcome the computational limits of this approach, we propose a new algorithm that converges directly to the whole set $\{h_k(a_k^1), \dots, h_k(a_k^{l_k})\}$.

B.2 Description of the algorithm

In this section we consider $k \in \{1, \dots, n\}$ to be fixed and we describe the EP algorithm for the analysis of the k -th parameter. As mentioned in Section B.1, the goal is to approximate $h_k(x)$, that is to provide sufficiently good approximations of $h_k(a_k^j)$, for certain $a_k^1, \dots, a_k^{l_k}$.

In order to explore A_k uniformly, we use an evolutionary algorithm with diversity pressure mechanism. Let $C_1, \dots, C_{l_k}$ be l_k different semantic categories to which one can associate an element belonging to A_k . In our approach, we consider that categories can be identified with intervals $I_1, \dots, I_{l_k} \subseteq A_k$, and that such intervals form a partition of A_k :

1. $I_i \cap I_j = \emptyset$ if $i \neq j$, and
2. $\bigcup_{i=1}^{l_k} I_i = A_k$.

We assume that these categories are good enough to characterize A_k , that is they are a good discretization of A_k . For each $a \in A_k$, we denote by $\mathbf{cat}(a)$ the category of a , that is the unique category C_j such that $a \in I_j$. We also denote by $\mathbf{Cat} : A \rightarrow \{C_1, \dots, C_{l_k}\}$ be the map defined by $\mathbf{Cat}(\bar{a}) = \mathbf{cat}(a_k)$, where $\bar{a} = (a_0, \dots, a_{n-1})$; it defines the category of a parameter vector as the category of its k -th coordinate. The algorithm is devised to find parameter vectors $\{\bar{a}^1, \dots, \bar{a}^{l_k}\}$, with $\bar{a}^j = (a_1^j, \dots, a_n^j)$ and $a_i^j \in A_i$, such that :

1. Each vector lies in a different category : $\mathbf{Cat}(\bar{a}^j) = C_j$ for $j = 1 \dots l_k$. This means that, when projecting on the k -th coordinate, our sample is representative of the whole space A_k .
2. For each $\bar{a}^j$, the value of $f(\bar{a}^j)$ is a good approximation of $h_k(\bar{a}^j)$.

The idea of the algorithm is to generate successive sets of solutions and to keep only the best solution per category. At each iteration the set of best solutions is updated.

The algorithm is composed of the following steps :

Initialization. We construct an initial set of parameter vectors.

Step 0. We first generate a random set X_0 of parameter vectors, that is $X_0 = \{\bar{a}^1, \dots, \bar{a}^M\}$, with $\bar{a}^j = (a_1^j, \dots, a_n^j)$ and $a_i^j \in A_i$. The number M may be much bigger than l_k .

Approximation loop. We construct X_{N+1} from X_N .

Step 1. We construct the sets $S_i = \{\bar{a} \in X_N : \mathfrak{Cat}(\bar{a}) = C_i\}$ for $i = 1, \dots, l_k$ (we may get $S_i = \emptyset$).

Step 2. Here we apply elitism, that is we select only the best parameter vector in each category : We construct the sets $E_i = \{\bar{a} \in S_i : f(\bar{a}) \leq f(\bar{a}') \forall \bar{a}' \in S_i\}$ for $i = 1, \dots, l_k$, and $H = \bigcup_{i=1}^{l_k} E_i$. In practice all the sets E_i will be either empty (if $S_i = \emptyset$) or composed by only one parameter vector ; if there exist more more than one that are minimal in S_i , then we can randomly choose a fixed number of them to compose E_i .

Step 3. Generate H^* from H by randomly modifying the parameter vectors in H . We can for instance generate each vector in H^* by applying a gaussian variation to an vector in H .

Step 4. Define the set X_{N+1} as the union of H and H^* . Check if a predefined stopping criterion is met (number of iterations, stabilization of the solutions, etc.) : Go to Step 5 if it is, iterate Steps 1 to 4 if is not.

Ending. When the stopping criterion is met, we can output our approximation to the function $h_k(x)$.

Step 5. If $\{\bar{a}^1, \dots, \bar{a}^m\}$ is the last H computed, we define our approximation to $h_k(x)$ as the set of 2-tuples $\{(\bar{a}_k^1, f(\bar{a}^1)), \dots, (\bar{a}_k^m, f(\bar{a}^m))\}$. Let us note that by construction $m \leq l_k$, but in practice, when the number of iterations is high enough (see section B.3), we get $m = l_k$.

B.3 Validity

As we said in section B.1, our approach consists in estimating the impact of the k -th parameter on the performance of the model, by finding a good approximation to the function $h_k(x)$. To clarify why our method provides indeed such a good approximation, we make the following remarks :

1. At each iteration we randomly generate new solutions from old ones. Given a solution $\bar{a}$ such that $\mathfrak{C}(\bar{a}) = C_j$, the probability of getting a new solution $\bar{a}'$ from $\bar{a}$ such

that $\mathfrak{C}(\bar{a}') = C_{j'}$, with $j' \neq j$, is different from 0 (this is clearly the case if we use, for instance, a gaussian variation). Hence, if enough iterations are repeated, every category will eventually be reached by as many solutions as we wish.

2. Let us consider $\alpha = \inf\{f(\bar{a}) : \mathfrak{Cat}(\bar{a}) = C_j\} = \inf\{h_k(a) : \mathfrak{cat}(a) = C_j\}$. If the f is sufficiently regular (it is enough if it is continuous, or if it is just semi-continuous on its local minima), then, by the an analogous argument to that in point 1., we will eventually find an solution $\bar{a}$ such that $\mathfrak{Cat}(\bar{a}) = C_j$ and $f(\bar{a})$ is as close to α as we want.

These remarks, together with the fact that we can consider as many categories as needed, justify our claim. We should note that, as it is usually the case with evolutionary algorithms, we do not provide a precise speed of convergence for our algorithm ; however, experimental results are very satisfactory.

B.4 Heuristic improvement

In section B.2 we have presented the most basic version of our algorithm, for the sake of clarity. However in practice we use a variation of it, heuristically devised, to improve its performance. In this section we present these modifications. We use the same notation as in section B.2.

The main point of this modified version is the random generation of new solutions (step 3). In this part we rely on the standard techniques used in genetic algorithms, in which the random variation comes from two biologically-inspired operators : *mutation* and *crossover*. This operators are not applied to the whole set H of solutions, but rather on a subset $H_0 \subseteq H$ which is generated by a certain *selection* mechanism (we will explain below this selection mechanism). From H_0 we generate H^* in two steps : We first generate a new set of solutions H'_0 by applying a *SBX*-crossover to H_0 , and then we apply a self-adapting gaussian mutation to H'_0 . The result will be our H^* .

In the generation of $H_0 \subseteq H$ we follow a standard selection mechanism : binary tournament selection. It consists in randomly choosing two solutions $x, y \in H$, comparing them via a certain function $g : H \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ and then keeping the best (x is kept if $g(x) \geq g(y)$) ; we repeat this procedure until we reach the desired size of H_0 .

Note. Although we have defined H_0 as a set (elements in H_0 are unique), we can also define H_0 as a tuple, allowing then a same solution to appear more than once.

One feature that is specific to our approach is the definition of the function g , that we call *local contribution*.

Definition. Let $H = \{\bar{a}^1, \dots, \bar{a}^m\}$ and $\bar{a}^1 < \dots < \bar{a}^m$. Given a solution $\bar{a}^j \in H \setminus \{\bar{a}^1, \bar{a}^m\}$, let Δ_j denote the area of the triangle in $\mathbb{R}^2$ formed by the 2-tuples $(\bar{a}_k^{j-1}, f(\bar{a}^{j-1}))$, $(\bar{a}_k^j, f(\bar{a}^j))$ and $(\bar{a}_k^{j+1}, f(\bar{a}^{j+1}))$. Then we define the *local contribution* of $\bar{a}^j$, as

$$g(\bar{a}^j) = (-1)^\varepsilon \Delta_j,$$

where $\varepsilon = 0$ if the point $(\bar{a}_k^j, f(\bar{a}^j))$ is below the straight line from $(\bar{a}_k^{j-1}, f(\bar{a}^{j-1}))$ and $(\bar{a}_k^{j+1}, f(\bar{a}^{j+1}))$, and $\varepsilon = 1$ if it is not. If $\bar{a}^j$ is extreme, i.e. $\bar{a}^j \in \{\bar{a}^1, \bar{a}^m\}$, then we define $g(\bar{a}^j) = \infty$.

We have just described how to generate a new set of solutions H^* from H . The heuristics behind this procedure is to give some priority to the generation of new solutions that are either locally good, which accelerates the approximation to the local minima in each category, or on the extremes, which widens the exploration of the space.

In order to describe the version of the algorithm that we use in experiments, the other point we should mention is the stopping criterion. A natural choice would be based on the stability of the successive H computed : if we detect no important changes from one H to the next one (during several iterations), the algorithm stops. We can measure this changes in different ways, for instance considering the function $F(H) = \sum_{\bar{a} \in H} f(\bar{a})$. However in practice we consider a maximal computation time as the stopping criterion and the stability becomes an element of subsequent analysis.

Procédure de génération de la spatialisation des systèmes de peuplement pour l'initialisation des modèles SimpopLocal et SimpopNet

C.1	La nécessité de situations initiales à structure géographique plausible	354
C.2	Une procédure aléatoire de génération de situations initiales	354

C.1 La nécessité de situations initiales à structure géographique plausible

L'évolution d'une simulation d'un modèle à processus spatiaux dépend fortement de la configuration spatiale initiale. Pour donner sens aux structures spatiales engendrées par les processus simulés, il est donc nécessaire de les interpréter à la lumière de la situation initiale choisie. De plus, la temporalité de ces processus dépend elle aussi de cette situation initiale. Par exemple, avec le modèle de Gibrat (GIBRAT, 1931) de croissance urbaine, les temps de simulation nécessaires pour engendrer des distributions log-normale de tailles de ville sont beaucoup plus longs lorsque la distribution initiale est homogène que lorsque celle-ci est déjà faiblement hiérarchisée.

Pour une meilleure représentativité et compréhension des processus spatiaux de SimpopLocal et de SimpopNet, nous voulons les simuler sur des situations initiales qui présentent une cohérence géographique. Des distributions homogènes de tailles ne sont qu'exceptionnellement observées au sein d'un système de peuplement réel, une telle situation initiale ne présente donc que peu d'intérêts et il ne sera pas facile d'en interpréter les résultats de simulation.

L'enjeu est donc de générer des configurations spatiales de systèmes de peuplements qui suivent les grandes caractéristiques des systèmes de peuplement (c.f. chapitre 1 et section 1.5). Deux grands faits stylisés paraissent primordiaux : une répartition spatiale pseudo-christallérienne des centres de peuplement (tel que les distances moyennes séparant les plus grands centres de peuplement sont supérieures aux distances moyennes séparant les plus petits centres de peuplement) et une configuration du réseau de communication (distribution spatiale des liens interurbains) qui suit la même logique (les plus grands centres de peuplement présentent des connexions interurbaines à plus longues distances et présente une meilleure accessibilité que les plus petits centres de peuplement). Cependant des situations initiales qui suivent ces critères ne sont pas faciles à générer de façon automatique. Nous avons proposé une procédure, mais celle-ci présente encore quelques difficultés à surmonter.

C.2 Une procédure aléatoire de génération de situations initiales

Nous avons proposé une procédure générique pour générer de manière aléatoire des situations initiales pour les deux modèles SimpopLocal et SimpopNet ¹. Elle se déroule en trois étapes :

1. Le code source est retranscrit sur la figure C.3

1. Un nombre prédéterminé (100) d'agents centres de peuplement (SimpopLocal) ou d'agents ville (SimpopNet) est généré². La taille démographique (attribut *Population*) de chaque agent est tiré au sort selon une loi de distribution paramétrée en fonction de la situation initiale voulue. Pour SimpopLocal, la distribution initiale des tailles de centres de peuplement suit une loi log-normale. Pour le modèle SimpopNet la distribution des tailles de villes suit une loi puissance.
2. Les agents sont ensuite classés en trois catégories selon leur taille : la classe 1 est constituée par les plus grandes villes, la classe 2 par les villes de taille moyenne et la classe 3 par les plus petites. Chaque catégorie englobe le même total de population, i.e. chaque catégorie représente un tiers de la population totale. Ces villes sont ensuite localisées successivement par classe mais de façon aléatoire en essayant de les répartir suivant la théorie des lieux centraux (CHRISTALLER, 1933). Pour ce faire, une première ville de la classe 1 est d'abord située aléatoirement dans l'espace de simulation. Un cercle concentrique d'un rayon spécifique à la classe 1 délimite une zone *buffer* à l'intérieur de laquelle aucune autre ville de la classe 1 ne peut être située. Toutes les villes de la classe 1 sont ainsi localisées les unes après les autres de façon aléatoire tout en respectant les zones *buffer*. On procède de la même manière pour localiser les villes de la classe 2 puis celles de la classe 3, sachant que le rayon des zones *buffer* propre à chaque classe est décroissant : des villes de classes 3 peuvent être plus rapprochées que des villes de classe 1 (le rayon est plus petit). De plus, il existe un espacement minimum entre les villes qui est équivalent au rayon *buffer* des villes de classe 3 (on considère donc que l'espacement minimum entre deux villes est équivalent à l'espacement minimum entre deux villes de classe 3). Cette étape de la construction de l'état initial est décrite graphiquement par la figure C.1.
3. Une fois toutes les villes localisées, des liens entre les villes sont créés de façon systématique. Chaque classe possède une portée maximale propre pour établir des liens : les villes de classes 1 ont des portées à plus longue distance que les villes de classe 2, qui ont elles-mêmes des portées à plus longue distance que les villes de classe 3. Les villes de classe 1 créent des liens avec toutes les autres villes de classe 1 présentes dans leur portée. Les villes de classe 2 et 3 créent des liens avec toutes les autres présentes dans leur portée. Cette étape est décrite graphiquement par la figure C.2.

Pour initialiser le modèle SimpopNet, nous souhaitons produire des réseaux inter-urbains planaires, c'est-à-dire des réseaux dans lesquels aucuns liens ne se croisent (en

2. Pour plus de clarté dans la suite de la description de la procédure, nous désignerons ces agents des agents villes indifféremment du modèle auquel on se réfère.

dehors des nœuds déjà existants bien sur). Bien qu'il soit en théorie possible de générer un réseau planaire grâce à la procédure décrite, la probabilité d'en générer un de façon aléatoire est très faible. Dans l'attente de trouver une autre procédure aléatoire, nous avons opté pour une solution manuelle. La situation initiale utilisée pour les expérimentations sur le modèle SimpopNet a été obtenue après une légère retouche d'une situation générée de façon aléatoire suivant la procédure décrite (retraits de quelques liens de façon à obtenir un réseau planaire). Cette procédure aléatoire de génération de situation initiale géographique a donc besoin d'être affinée. En plus du besoin ponctuel de retouches manuelle, l'adéquation entre la distribution des tailles de villes et l'organisation du réseau de communication interurbain n'est pas encore assez optimisée. En effet, sur certaines configurations générées, la corrélation entre la taille des villes et leur accessibilité est presque nulle (c.f. figure 5.26), ce qui n'est pas en accord avec les données empiriques. Néanmoins ce constat ne remet nullement en cause les résultats du modèle SimpopNet car ceux-ci s'appuient sur la comparaison de simulations à situation initiale égale.

Nous voulons souligner par cette annexe la difficulté à générer des situations initiales aux configurations spatiales cohérentes d'un point de vue géographique. Cette problématique offre des pistes de recherche passionnantes.

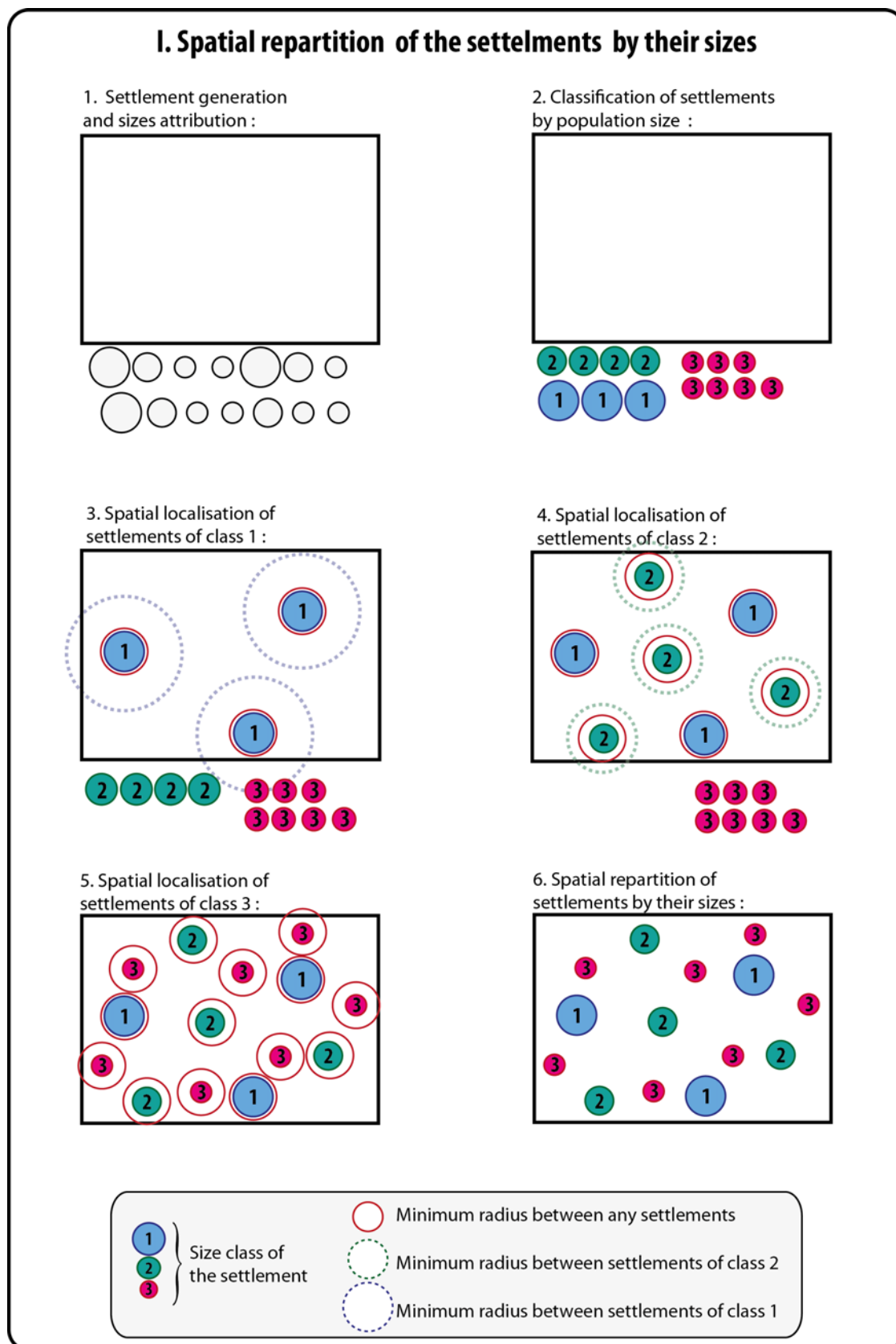
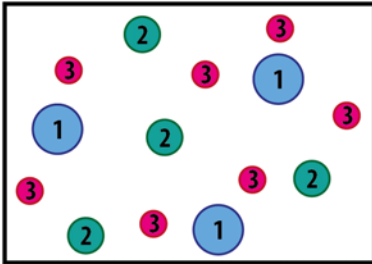


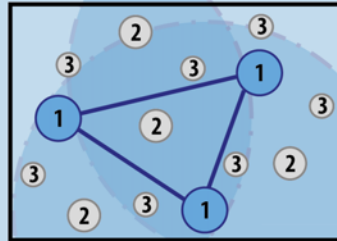
Figure C.1 – Procédure de répartition spatiale pseudo-christalérienne des tailles de villes

II. Creation of the interaction network

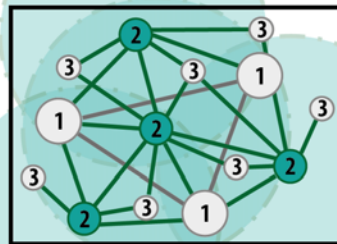
1. Spatial repartition of settlements by their sizes :



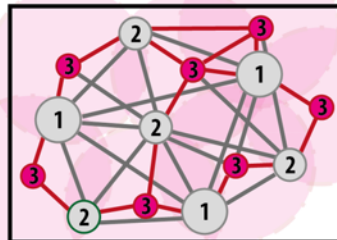
2. Creation of the links corresponding to settlements of class 1 :



3. Creation of the links corresponding to settlements of class 2 :



4. Creation of the links corresponding to settlements of class 3 :



5. Interaction network initialisation :

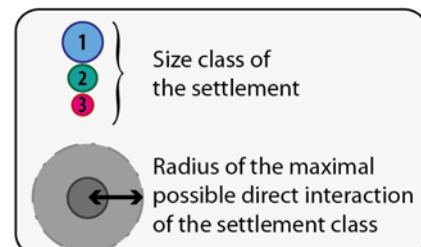
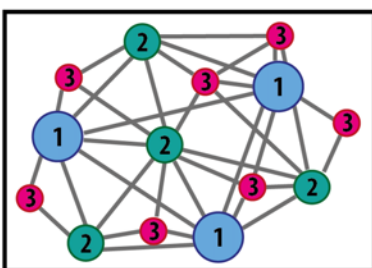


Figure C.2 – Procédure de création d'un réseau de communication interurbain reflétant la distribution spatiale pseudo-christalérienne des tailles de villes

```

*****
;
; Setup initial conditions
;
*****
settlements-own
[ population
category]

patches-own
[ occ-cat1
occ-cat2
occ-cat3
occ-radius]

;
*****

to setup-settlements
create-settlements 100
[
set population false
set category false
]

set-population popSD popM ; generates a log-normal initial settlement size distribution
update-categories ; classifies the settlements into 3 categories according to their sizes
distribute_Christaller ; spatially distributes the settlements according to the central places theory
connect_Christaller ; generates an network of links between settlements according to their sizes
end

to set-population [popstdv popmean]
; This procedure will lead to a log-normal distribution of settlement sizes

let sigmapop sqrt (ln (((popstdv * popstdv) / (popmean * popmean)) + 1))
let mu ln (popmean) - (sigmapop / 2)

ask settlements
[
set population exp (random-normal mu sigmapop)
]
end

to update-categories
ask settlements [set category false]
foreach sort-by [[population] of ?1 > [population] of ?2] settlements
[ ask ? [ set-category ] ]
end

to set-category
ifelse sum [population] of settlements with [categorie = 1] < (sum [population] of settlements / 3)
[
set category 1
set size 5
]
[
ifelse sum [population] of settlements with [categorie = 2] < (sum [population] of settlements / 3)
[set category 2 set size 4]
[set category 3 set size 3]
]
end

to distribute_Christaller

ask settlements with [categorie = 1] [ move-to one-of patches with [occ-cat1 = 0 and occ-radius = 0]
ask patches in-radius radius-cat1 [set occ-cat1 1]
ask patches in-radius radius-cat3 [set occ-radius 1]]

ask settlements with [categorie = 2] [ move-to one-of patches with [occ-cat2 = 0 and occ-radius = 0]
ask patches in-radius radius-cat2 [set occ-cat2 2]
ask patches in-radius radius-cat3 [set occ-radius 1]]

ask settlements with [categorie = 3] [ move-to one-of patches with [occ-cat3 = 0 and occ-radius = 0]
ask patches in-radius radius-cat3 [set occ-cat3 3]
ask patches in-radius radius-cat3 [set occ-radius 1]]

end

to connect_Christaller

ask settlements with [categorie = 1]
[ create-links-with other settlements with [categorie = 1] in-radius porte-radius-cat1 ]
ask settlements with [categorie = 2]
[ create-links-with other settlements in-radius porte-radius-cat2 ]
ask settlements with [categorie = 3]
[ create-links-with other settlements in-radius porte-radius-cat3 ]

end

```

Bibliographie

- ALLEN, P. M. et M. SANGLIER (1979). « A dynamic model of growth in a central place system ». In : *Geographical Analysis* 11.3, p. 256–272.
- AMBLARD, F. (2003). « Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées : Application à des modèles de dynamiques d’opinions ». Thèse de doct. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- AMBLARD, F., P. BOMMEL et J. ROUCHIER (2007). « Assessment and Validation of Multi-agent Models ». In : *Multi-Agent Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. Sous la dir. de Phan D. et Amblard F. Oxford : Bardwell Press, p. 93–114.
- AMBLARD, F. et D. PHAN, éd. (2006). *Modélisation et Simulation Multi-agents Applications pour les Sciences de l’Homme et de la Société*. London : Hermes Science Publications. ISBN : 2746213109.
- ARRAULT, J.-B. (2007). « Penser à l’échelle du Monde. Histoire conceptuelle de la mondialisation en géographie (fin du XIXe siècle/entre-deux-guerres) ». Thèse de doct. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.
- ARTHUR, B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. University of Michigan Press.
- (2009). *The Nature of Technology : What It Is and How It Evolves*. London : Allen Lane.
- AUERBACH, F. (1913). *Das gesetz der bevölkerungskonzentration*.
- AXELROD, R.L. (1997). *The complexity of cooperation : Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton Univ Pr.
- AXTELL, R. et R. FLORIDA (2006). « Emergent Cities : Micro-foundations of Zipf’s Law ». In : *Working Paper*.

-
- AXTELL, R.L., J.M. EPSTEIN et al. (2002). « Population growth and collapse in a multi-agent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley ». In : *PNAS* 99.Suppl 3, p. 7275.
- BACCAÏNI, B. et D. PUMAIN (1998). « Les migrations dans le système des villes françaises de 1982 à 1990 ». In : *Population (French Edition)*, p. 947–977.
- BAIROCH, P. (1985). *De Jéricho à Mexico : villes et économie dans l'histoire*. Paris : Gallimard.
- BAIROCH, P., J. BATOU et P. CHEVRE (1988). *La population des villes européennes, 800-1850 : Banque de données et analyse sommaire des résultats*. T. 2. Droz.
- BAIROCH, P. et G. GOERTZ (1986). « Factors of Urbanisation in the Nineteenth Century Developed Countries A Descriptive and Econometric Analysis ». In : *Urban Studies* 23.4, p. 285–305.
- BALCI, O. (1998). « Verification, validation, and testing ». In : *Handbook of Simulation : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. Sous la dir. de J. BANKS. Wiley. Chap. 10, p. 335–393.
- BANISTER, D. et Y. BERECHMAN (2001). « Transport investment and the promotion of economic growth ». In : *Journal of transport geography* 9.3, p. 209–218.
- BANOS, A. (déc. 2013). « Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en Géographies et SHS ». HDR. Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne.
- BANOS, A. et L. SANDERS (2012). « Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes ». In : *La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain*. Sous la dir. de G. HEGRON. Commissariat général au développement durable, p. 52–64.
- BARABASI, A.-L. et R. ALBERT (1999). « Emergence of scaling in random networks ». In : *science* 286.5439, p. 509–512.
- BARBUT, M. (1998). « Une famille de distributions : des paretiennees aux "contra-paretiennees" ». In : *Mathématiques et sciences humaines. Mathematics and social sciences* 141.
- BARTHELEMY, M. (nov. 2010). *Spatial Networks*. Physics Reports 499. URL : <http://arxiv.org/abs/1010.0302>.
- BARTHÉLEMY, M. et A. FLAMMINI (2006). « Optimal traffic networks ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 2006.07, p. L07002.
- BATTY, M. (2001). « Polynucleated urban landscapes ». In : *Urban studies* 38.4, p. 635–655.
- (2008). « Fifty Years of Urban modelling : Macro-Statics to Macro-Dynamics ». In : *The Dynamics of Complex Urban Systems*. Springer, p. 1–21.
- BATTY, Michael et Paul A LONGLEY (1994). *Fractal cities : a geometry of form and function*. Academic Press.
- BAZIN, S. et al. (2011). « Grande vitesse ferroviaire et développement économique local : une revue de la littérature ». In : *Recherche Transports Sécurité* 27.3, p. 215–238.
-

- BEGUIN, H. et I. THOMAS (1997). « Morphologie du réseau de communication et localisations optimales d'activités. Quelle mesure pour exprimer la forme d'un réseau ? » In : *Cybergeo* 26.
- BERROIR, S. et al. (2005). « La diffusion spatiale des pièces euro étrangères en Belgique et en France ». In : *Belgeo*, p. 445–459.
- BERRY, B.J.L. (1961). « City size distributions and economic development ». In : *Economic development and cultural change*, p. 573–588.
- (1964). « Cities as systems within systems of cities ». In : *Papers in Regional Science* 13.1, p. 147–163.
- (1991). *Long-wave rhythms in economic development and political behavior*. Johns Hopkins University Press Baltimore.
- BETTENCOURT, L., J. LOBO, D. HELBING et al. (2007). « Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities ». In : *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 104.17, p. 7301–7306.
- BETTENCOURT, L., J. LOBO et D. STRUMSKY (2007). « Invention in the city : Increasing returns to patenting as a scaling function of metropolitan size ». In : *Research Policy* 36.1, p. 107–120.
- BETTENCOURT, L., J. LOBO et G. WEST (2009). « The self similarity of human social organization and dynamics in cities ». In : *Complexity perspectives on innovation and social change*. Lane D. et al. Methodos Series 7. Springer.
- BLUMENFELD-LIEBERTHAL, E. et J. PORTUGALI (2010). « Network cities : A complexity-network approach to urban dynamics and development ». In : *Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics*. Sous la dir. de B. JIANG et X. YAO. Springer, p. 77–90.
- BOURGINE, P. et al. (2009). « French Roadmap for complex Systems 2008-2009 ». In : *arXiv preprint arXiv :0907.2221*.
- BRAKMAN, S. et al. (1999). « The return of Zipf : towards a further understanding of the rank-size distribution ». In : *Journal of Regional Science* 39.1, p. 183–213.
- BRAUDEL, F. (1967). *Civilisation matérielle et capitalisme : XVe-XVIIIe siècle*. A. Colin.
- BRETAGNOLLE, A. (1999). « Les systèmes de villes dans l'espace-temps : effets de l'accroissement des vitesse de déplacement sur la taille et l'espacement des villes ». Thèse de doct. Paris I Panthéon-La Sorbonne.
- (2003). « Vitesse des transports et sélection hiérarchique entre les villes françaises ». In : *Données urbaines* 4, p. 309–323.
- (2005). *Les villes dans l'espace-temps : vitesse des communications et structuration des territoires à l'échelle intra et interurbaine*.
- (juin 2009). « Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée (France, Europe, états-Unis) ». HDR. Panthéon-Sorbonne - Paris I.

-
- BRETAGNOLLE, A., E. DAUDET et D. PUMAIN (2006). « From theory to modelling : urban systems as complex systems ». In : *Cybergeo* 335, p. 1–17.
- BRETAGNOLLE, A., B. GLISSE et al. (juin 2007). « Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents (Europe, Etats-Unis) ». In : Cérisy.
- BRETAGNOLLE, A., M. GUÉROIS et al. (2011). « Rapport final du projet Harmonie-cités ». In : *ANR Corpus et Outils de la Recherche en SHS édition 2007*.
- BRETAGNOLLE, A., H. MATHIAN et al. (2000). « Long-term dynamics of European towns and cities : towards a spatial model of urban growth ». In : *Cybergeo*.
- BRETAGNOLLE, A., F. PAULUS et D. PUMAIN (2002). « Time and space scales for measuring urban growth ». In : *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- BRETAGNOLLE, A. et D. PUMAIN (2010). « Simulating Urban Networks through Multiscalar Space-Time Dynamics : Europe and the United States, 17th-20th Centuries ». In : *Urban Studies* 47.13, p. 2819–2839.
- BRETAGNOLLE, A., D. PUMAIN et C. VACCHIANI-MARCUZZO (2009). « The organization of urban systems ». In : *Complexity perspectives in innovation and social change*. Springer, p. 197–220.
- BRETAGNOLLE, A. et M.-C. ROBIC (2005). « Révolution des technologies de communication et représentations du monde. 3 : Au risque de l'expérimentation ». In : *L'information géographique* 69, p. 5–27.
- BURA, S. et al. (1996). « Multiagent systems and the dynamics of a settlement system ». In : *Geographical Analysis* 28.2, p. 161–178.
- BUTTERLIN, P. (2003). *Les temps proto-urbains de Mésopotamie : contacts et acculturation à l'époque d'Uruk au Moyen-Orient*. CNRS.
- CALVEZ, B. et G. HUTZLER (2006). « Automatic tuning of agent-based models using genetic algorithms ». In : *Multi-Agent-Based Simulation VI*, p. 41–57.
- CASANOVA, H. et F. BERMAN (2003). « Parameter Sweeps on the Grid with APST ». In : *Grid Computing : Making the Global Infrastructure a Reality*, p. 773–787.
- CASTIGLIONE, F. et al. (déc. 2007). « Optimization of HAART with genetic algorithms and agent-based models of HIV infection ». In : *Bioinformatics* 23.24, p. 3350–3355.
- CAUVIN, C., H. REYMOND et J. HIRSCH (1985). *L'espacement des villes : théorie des lieux centraux et analyse spectrale*. Paris, France : Ed. du CNRS, 186p.
- CHAPELON, L. (2004). « Accessibilité ». In : *Hypergeo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article30>.
- CHERRY, J.F. (2005). « Peer Polity Interaction ». In : *Archaeology : the key concepts*. Sous la dir. de Renfrew C & Bahn P.G. Routledge, p. 147–150.
- CHILDE, V.G. (1950). « The urban revolution ». In : *Town Planning Review* 21.1, p. 3.
- CHRISTALLER, W. (1933). *Die Zentralen Orte in Süddeutschland*. Gustave Fischer. URL : <http://cybergeo.revues.org/3198>.
- CLAVAL, P. (1982). *La logique des villes. Essai d'urbanologie*. T. 15. LITEC.
-

- COTTINEAU, C. et P. CHAPRON (mai 2013). « Step-wise modeling. An incremental method for modeling cities trajectories in the post-Soviet urban system. » In : *Proceedings of the European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography ECTQG 2013*. Dourdan, p. 60–62. URL : <https://www.dropbox.com/s/4x11ohgxuvqsddi/AbstractsECTQG2013.pdf>.
- CROOKS, A., C. CASTLE et M. BATTY (2008). « Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation ». In : *Computers, Environment and Urban Systems* 32.6, p. 417–430.
- D'AUBIGNY, G. et al. (2000). « Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale ». In : *Cybergeo* 126.
- DAVIS, M. (2007). *Le pire des mondes possibles : de l'explosion urbaine au bidonville global*. La Découverte.
- DE VRIES, J. (1984). *European Urbanization 1500-1800*. Sous la dir. de Cambridge : Harvard University PRESS.
- DEB, K. et al. (2000). « A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization : NSGA-II ». In : *Lecture notes in computer science* 1917, p. 849–858.
- DEFFUANT, G. et al. (2003). « Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée ». In : *Actes des 10e Journées de Rochebrune, rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels, statut épistémologique de la simulation*, p. 45–64.
- DEMOULE, J.-P. (oct. 2007). « Editorial : Naissance de la ville ». In : *Archéopages* 21, p. 3.
- DESMARAIS, G. (1998). « Trois concepts-clés pour les modèles morphodynamiques de la ville ». In : *Cahiers de géographie du Québec* 42.117.
- DI PIETRO, A., L. WHILE et L. BARONE (2004). « Applying evolutionary algorithms to problems with noisy, time-consuming fitness functions ». In : *Evolutionary Computation, 2004. CEC2004. Congress on*. T. 2, p. 1254–1261.
- DIAMOND, J. (1997). *Guns, Germs, and Steel : The Fates of Human Societies*. W. W. Norton & Company.
- DIMOU, M. et A. SCHAFFAR (2011). « Les théories de la croissance urbaine ». In : *Revue d'économie politique* 121.2, p. 179–207.
- DORIGO, G. et W. TOBLER (1983). « Push-Pull Migration Laws ». In : *Annals of the Association of American Geographers* 73.1, p. 1–17.
- DRENNAN, R.D. et C.E. PETERSON (2004). « Comparing archaeological settlement systems with rank-size graphs : a measure of shape and statistical confidence ». In : *Journal of Archaeological Science* 31.5, p. 533–549.

-
- DUBOZ, R. et al. (2010). « Application of an evolutionary algorithm to the inverse parameter estimation of an individual-based model ». In : *Ecological Modelling* 221, p. 840–849.
- DUNDON-SMITH, D. et R. GIBB (1994). « The Channel Tunnel and regional economic development ». In : *Journal of Transport Geography* 2.3, p. 178–189.
- DURAND-DASTÈS, F. et al. (1998). *Archaeomedes : Des oppida aux métropoles*. Paris : Anthropos.
- DURANTON, G. (2006). « Some foundations for Zipf’s law : product proliferation and local spillovers ». In : *Regional Science and Urban Economics* 36.4, p. 542–563.
- (2012). « La croissance urbaine : Déterminismes vs Bruit ». In : *Région et Développement* 36, p. 11–30.
- DURANTON, G. et D. PUGA (2004). « Micro-foundations of urban agglomeration economies ». In : *Handbook of regional and urban economics* 4, p. 2063–2117.
- EDMONDS, B. et S. MOSS (2005). *From KISS to KIDS—an ‘anti-simplistic’ modelling approach*.
- ECKHOUT, J. (2004). « Gibrat’s law for (all) cities ». In : *American Economic Review*, p. 1429–1451.
- EMMERICH, M., N. BEUME et B. NAUJOKS (2005). « An EMO Algorithm Using the Hypervolume Measure as Selection Criterion ». In : *Evolutionary Multi-Criterion Optimization : Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, 2005, Proceedings*. T. 3410. Springer, p. 62.
- EPSTEIN, J.M. et R. AXTELL (1996). *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up (Complex Adaptive Systems)*. The MIT Press.
- ESPINOSA, O.B. (2012). « A Genetic Algorithm for the Calibration of a Micro-Simulation Model ». In : *CoRR* abs/1201.3456.
- F., Stonedahl, Rand W. et Wilensky U. (2010). « Evolving viral marketing strategies ». In : *Proceedings of the 12th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. GECCO ’10. New York, NY, USA : ACM, 1195–1202.
- FAGIOLO, G., A. MONETA et P. WINDRUM (2007). « A Critical Guide to Empirical Validation of Agent-Based Models in Economics : Methodologies, Procedures, and Open Problems ». In : *Computational Economics* 30.3, p. 195–226.
- FAVARO, J.-M. (2007). « Croissance urbaine et cycles d’innovations dans les systèmes de villes : une modélisation par les interactions spatiales ». Thèse de doct. Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- FAVARO, J.-M. et D. PUMAIN (2011). « Gibrat revisited : An urban growth model incorporating spatial interaction and innovation cycles ». In : *Geographical Analysis* 43.3, p. 261–286.
-

- FELDMAN, M. P et R. FLORIDA (1994). « The geographic sources of innovation : technological infrastructure and product innovation in the United States ». In : *Annals of the Association of American Geographers* 84.2, p. 210–229.
- FLETCHER, R. (juin 1986). « Settlement Archaeology : World-Wide Comparisons ». In : *World Archaeology* 18.1, p. 59–83.
- FONSECA, C., L. PAQUETE et M. LOPEZ-IBANEZ (2006). « An improved dimension-sweep algorithm for the hypervolume indicator ». In : *Evolutionary Computation, 2006. CEC 2006. IEEE Congress on*. IEEE, p. 1157–1163.
- FRANKHAUSER, P. (1994). *La Fractalité des Structures Urbaines*. Sous la dir. de Paris ANTHROPOS. coll.Villes.
- FREEMAN, C. et F. LOUÇA (2001). *As time goes by : the information revolution and the industrial revolutions in historical perspective*. New York : Oxford University Press, 478p.
- FUJITA, M., P.R. KRUGMAN et A.J. VENABLES (2001). *The spatial economy : cities, regions and international trade*. The MIT press.
- GABAIX, X. (1999a). « Zipf's Law and the Growth of Cities ». In : *The American Economic Review* 89.2, p. 129–132.
- (1999b). « Zipf's law for cities : an explanation ». In : *The Quarterly Journal of Economics* 114.3, p. 739–767.
- GABAIX, X. et Y. IOANNIDES (2004). « The evolution of city size distributions ». In : *Handbook of regional and urban economics : cities and geography*. Sous la dir. de V. HENDERSON et J.-F. THISSE. North Holland. Chap. 4, p. 2341–2378.
- GARMY, P. (déc. 2009). « Villes, réseaux et systèmes de villes : contribution de l'archéologie ». HDR. Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne.
- GASTNER, M. et M. NEWMAN (2006). « Shape and efficiency in spatial distribution networks ». In : *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment* 2006.01, P01015.
- GIBRAT, R. (1931). « Les inégalités économiques ». In : *Librairie du Recueil Sirey, Paris*.
- GIVONI, M. (2006). « Development and Impact of the Modern High-speed Train : A Review ». In : *Transport reviews* 26.5, p. 593–611.
- GLAESER, E.L. (1994). « Cities, information, and economic growth ». In : *Cityscape* 1.1, p. 9–47.
- GLISSE, B. (2007). « Exploration scientifique par la conception collaborative de systèmes multi-agents ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie - Paris 6.
- GRASLAND, C. (2004). « Intercation Spatiale ». In : *Hypergeo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article2>.
- GRIMM, V., U. BERGER, F. BASTIANSEN et al. (2006). « A standard protocol for describing individual-based and agent-based models ». In : *Ecological modelling* 198.1, p. 115–126.

-
- GRIMM, V., U. BERGER, D. DEANGELIS et al. (2010). « The ODD protocol : a review and first update ». In : *Ecological Modelling* 221.23, p. 2760–2768.
- GROVE, M. (2011). « An archaeological signature of multi-level social systems : The case of the Irish Bronze Age ». In : *Journal of Anthropological Archaeology* 30.1, p. 44–61.
- GUÉRIN-PACE, F. (1993). « Dynamique lente et dynamique rapide dans le développement d'un système de villes ». In : *Croissance démographique et urbanisation : politique de peuplement et aménagement du territoire : séminaire international de Rabat (15-17 mai 1990)* 5, p. 283.
- GUÉRIN-PACE, F. et D. PUMAIN (1990). « 150 ans de croissance urbaine ». In : *Economie et statistique* 230.1, p. 5–16.
- GUMERMAN, G.J. et al. (2003). « The evolution of social behavior in the prehistoric American Southwest ». In : *Artificial life* 9.4, p. 435–444.
- GUTIERREZ, J. (2001). « Location, economic potential and daily accessibility : an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid–Barcelona–French border ». In : *Journal of transport geography* 9.4, p. 229–242.
- HÄGERSTRAND, T. (1952). « The propagation of Innovation waves ». In : *Lund Studies in Geography* serie B.4.
- (1953). *Innovation Diffusion as a spatial process*. University of Chicago Press : Translation by A. Pred, 1967.
- HAGGETT, P. (1965). *Locational Analysis in Human Geography*. London : Edward Arnold.
- HAGGETT, P. et R. CHORLEY (1969). *Network analysis in geography*. London : Edward Arnold.
- HALL, P. (1998). *Cities in civilization : culture, technology and urban order*.
- HENDERSON, J.V. (1974). « The sizes and types of cities ». In : *The American Economic Review* 64.4, p. 640–656.
- HEPPENSTALL, A.J., A.T. CROOKS et al. (2011). *Agent-based models of geographical systems*. Springer.
- HEPPENSTALL, A.J., A.J. EVANS et M.H. BIRKIN (2007). « Genetic algorithm optimisation of an agent-based model for simulating a retail market ». In : *Environment and Planning B : Planning and Design* 34, p. 1051–1070.
- HINTERDING, R. (1995). « Gaussian mutation and self-adaption for numeric genetic algorithms ». In : *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. T. 1, p. 384.
- HOLLAND, John H (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- HUDSON, J.C. (1969). « Diffusion in a central place system ». In : *Geographical Analysis* 1.1, p. 45–58.
-

- HUFF, D.L. (1964). « Defining and estimating a trading area ». In : *The Journal of Marketing* 28.3, p. 34–38.
- HUOT, J.-L., J.-P. THALMANN et D. VALBELLE (1990). *Naissance des cités*. Nathan.
- IACONO, M., D. LEVINSON et A. EL-GENEIDY (2008). « Models of transportation and land use change : a guide to the territory ». In : *Journal of Planning Literature* 22.4, p. 323–340.
- JANELLE, D.G. (1968). « Central place development in a time-space framework ». In : *The Professional Geographer* 20.1, p. 5–10.
- (1969). « Spatial reorganization : a model and concept ». In : *Annals of the Association of American Geographers* 59.2, p. 348–364.
- JANSSEN, M. (2009). « Understanding artificial anasazi ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12.4, p. 13.
- JOHNSON, G.A. (1977). « Aspects of regional analysis in archaeology ». In : *Annual Review of Anthropology* 6, p. 479–508.
- KALDOR, N. (1957). « A model of economic growth ». In : *The economic journal* 67.268, p. 591–624.
- KOHLER, T.A., C.D. JOHNSON et al. (2007). « Settlement ecodynamics in the prehispanic central Mesa Verde region ». In : sous la dir. de Kohler T. A. et van der LEEUW S. SAR Press, Santa Fe, NM. Chap. The model-based archaeology of socionatural systems, p. 61–104.
- KOHLER, T.A. et S.E. van der LEEUW (2007). *The model-based archaeology of socionatural systems*. SAR Press, Santa Fe, NM.
- KRUGMAN, P. (1996). « Confronting the mystery of urban hierarchy ». In : *Journal of the Japanese and International economies* 10.4, p. 399–418.
- LANE, D. et al. (2009). *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*. 1^{re} éd. Methodos Series 7. Springer.
- LANGLOIS, P. et E. DAUDÉ (2007). « Concepts et modélisations de la diffusion géographique ». In : *Cybergeo* 364.
- LAROQUE, D. et G. GIGAUDON (1985). « Petites villes et infrastructures de transports, 1851 - 1954 ». In :
- LE TEXIER, M. (2014). « Les circulations internationales au XXI^{ème} siècle en Europe : de l'étude des répartitions monétaires à la modélisation d'un système complexe ». Thèse de doct. Université Paris 7, Paris - Diderot.
- LE TEXIER, M. et G. CARUSO (2013, à paraître). « Aggregate and disaggregate dynamic spatial interaction approaches to modelling coins diffusion ». In : *Spatial Analysis and Location Modeling in Urban and Regional Systems*. Sous la dir. de J.C. THILL. Advances in Geographic Information Science Series. Berlin : Springer.

-
- LEEuw, S.E. van der, D. LANE et D. READ (2009). « The long-term evolution of social organization ». In : *Complexity Perspectives in Innovation and Social Change*. Springer, p. 85–116.
- LEFEVRE, B. (2007). « La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du Sud ». Thèse de doct. Ecole des Mines de Paris.
- LEPETIT, B. (1988). *Les villes dans la France moderne (1740-1840)*. Paris : Albin Michel.
- L’HOSTIS, A. (1996). « Transports et Aménagement du territoire : cartographie par images de synthèse d’une métrique réseau ». In : *Mappemonde* 3, p. 37–43.
- LIU, L. (1996). « Settlement patterns, chiefdom variability, and the development of early states in North China ». In : *Journal of anthropological archaeology* 15.3, p. 237–288.
- LOESCH, A. (1940). *Die raumliche ordnung der wirtschafft : eine untersuchung uber standort, wirtschaftsgebiete und internationalen handel*. Iena : G. Fischer.
- LOUAIL, T. (2010). « Comparer les morphogénèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d’agents—Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale ». Thèse de doct. Université d’Evry-Val d’Essonne.
- MARCUS, J. et J.A. SABLOFF, éd. (2008). *The ancient city : New perspectives on urbanism in the old and new world*. Santa Fe : School for Advanced Research.
- MENSCH, G. (1979). *Stalemate in technology : innovations overcome the depression*. Ballinger Cambridge, Mass.
- MIMEUR, C. (2013). « Le lien réseau/territoire à l’épreuve de la longue durée. Une approche par les humanités numériques ». Mémoire de Master2. Université de Bourgogne, Département de Géographie, Laboratoire ThéMA.
- MINER, D. (2010). « A framework for predicting and controlling system-level properties of agent-based models ». Thèse de doct. University of Maryland at Baltimore County.
- MINSKY, M. (1965). « Matter, mind and models ». In : *Artificial Intelligence* 77.
- MORICONI-EBRARD, F. (1993). *L’urbanisation du monde depuis 1950*. Anthropos.
- MOURET, J.-B. et J. CLUNE (2008). « Uncovering Phenotype-fitness maps using MOLE ». In : *connections* 5, p. 10.
- NAUJOKS, B., N. BEUME et M. EMMERICH (2005). « Multi-objective optimisation using S-metric selection : Application to three-dimensional solution spaces ». In : *Evolutionary Computation, 2005. The 2005 IEEE Congress on*. T. 2. IEEE, p. 1282–1289.
- NGO, T.A. et L. SEE (2011). « Calibration and validation of agent-based models of land cover change ». In : *Agent-based models of geographical systems*. Sous la dir. d’A.J. HEPPENSTALL et al. Springer. Chap. 10, p. 181–196.
- OFFNER, J.M. (1993). « Les effets structurants du transport : mythe politique, mystification scientifique ». In : *L’espace géographique* 3.24, p. 233–242.
- OURDNIK, A. (2010). « L’habitant et la cohabitation dans les modèles de l’espace habité ». Thèse de doct. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
-

- OUREDNIK, A. et P. DESSEMONTET (2007). « Interaction Maximization and the Observed Distribution of Urban Populations : An Agent-based Model of Humanity's Metric Condition ». In : *Proceedings of the 15th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography (ECTQG'07)*. Lausanne : UNIL, p. 291–296.
- PARR, J.B. (1970). « Models of city size in an urban system ». In : *Papers in Regional Science* 25.1, p. 221–253.
- PAULUS, F. (2004). « Coévolution dans les systèmes de villes : croissance et spécialisation des aires urbaines françaises de 1950 à 2000 ». Thèse de doct. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.
- PAULUS, F. et al. (2006). « An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws ». In : *Cybergeo* 343, p. 20.
- PEARSON, C.E. (1980). « Rank-Size Distributions and the Analysis of Prehistoric Settlement Systems ». In : *Journal of Anthropological Research* 36, p. 453–462.
- PENNISI, E. (2010). « Conquering by Copying ». In : *Science* 328.5975, p. 165.
- POIX, C. et Y. MICHELIN (2000). « Simulation paysagère : un modèle multi-agents pour prendre en compte les relations sociales ». In : *Cybergeo*.
- POULAIN, M. (1981). « Contribution à l'analyse spatiale d'une matrice de migration interne ». In : *Recherches Démographiques Cahier n°3*, 182p.
- PRED, A. (1973). « Systems of cities and information flows ». In : *Lund Studies in Geography* Ser B.38, p. 1–82.
- PRED, A.R. (1975). « Diffusion, organizational spatial structure, and city-system development ». In : *Economic Geography* 51.3, p. 252–268.
- (1977). *City-systems in advanced economies : past growth, present processes and future development options*. Hutchinson London.
- PUMAIN, D. (1982). « Chemin de fer et croissance urbaine en France au XIXe siècle ». In : *Annales de Géographie* 91.507, p. 529–550.
- (1991). « Commentary : Plea for the Experimentation and Comparison of Dynamic Models ». In : *Environment and Planning A* 23.4, p. 463–464.
- (1997). « Pour une théorie évolutive des villes ». In : *Espace géographique* 26.2, p. 119–134.
- (1998a). « Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain ». In : *Cahiers de géographie du Québec* 42.117, p. 349–366.
- (1998b). « Urban research and complexity ». In : *The city and its sciences*. Sous la dir. de C.S BERTUGLIA, A. BIANCHI et E. MELA. Physica Verlag, heidelberg, p. 323–361.
- (2000). « Settlement Systems in the Evolution ». In : *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography* 82.2, p. 73–87.
- (2003). « Le processus d'urbanisation ». In : *Démographie : analyse et synthèse, vol IV Les déterminants de la migration*. Sous la dir. de G. CAZELLI, J. VALLIN et G WUNSCH. Paris : INED, p. 101–124.

-
- PUMAIN, D. (2004a). « Centralité ». In : *Hypergeo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article46>.
- PUMAIN, D (2004b). « Lieux centraux ». In : *Hypergeo*. URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article13>.
- PUMAIN, D. (2004c). « Scaling laws and urban systems ». In : *Santa Fe Institute, Working Paper n 04-02 2*, p. 26.
- (2006). « Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems ». In : *Hierarchy in natural and social sciences*. Sous la dir. de Pumain D. Methodos series. Springer, p. 169–222.
- (2007). « Lois d'échelle et mesure des inégalités en géographie ». In : *Revue européenne des sciences sociales* 45.3, p. 56–65.
- (2009). « The evolution of city systems, between history and dynamics ». In : *International Journal of Environmental Creation* 12.1.
- (2011). « Une théorie géographique des villes ». In : *BSGLg* 55, p. 5–15.
- (2012). « Une Théorie Géographique Pour La Loi De Zipf ». In : *Region et Développement* 36, p. 31–54.
- PUMAIN, D., S. BAFFI et al. (2014). « Macrostructure and meso dynamics in systems of cities : an evolutionary theory based on comparing several countries of the world ». In : *Submitted to Urban Studies*.
- PUMAIN, D. et J.-P. GAUDIN (2002). « Systèmes de villes et pouvoir. L'analyse de Giovanni Botero à l'époque de la Renaissance ». In : *Cybergeo* 227.
- PUMAIN, D. et F. MORICONI-EBRARD (1997). « City size distributions and metropolisation ». In : *Geojournal* 43.4, p. 307–314.
- PUMAIN, D, F PAULUS et C VACCHIANI-MARCUZZO (2009a). « Innovation cycles and urban dynamics ». In : *Complexity perspectives in innovation and social change*. Springer, p. 237–260.
- PUMAIN, D., F. PAULUS et C. VACCHIANI-MARCUZZO (2009b). « Innovation cycles and urban dynamics ». In : *Complexity perspectives on innovation and social change*. Lane D. et al. Methodos Series 7. Springer.
- PUMAIN, D., F. PAULUS, C. VACCHIANI-MARCUZZO et J. LOBO (2006). « An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws ». In : *Cybergeo*.
- PUMAIN, D. et M.-C. ROBIC (1996). « Théoriser la ville ». In : *Anthropos*, Paris, p. 107–161.
- PUMAIN, D. et T. SAINT-JULIEN (1978). *Les dimensions du changement urbain*. Editions du Centre national de la recherche scientifique.
- (2010). *Analyse spatiale : Les interactions*. Paris : Armand Colin.
- PUMAIN, D. et L. SANDERS (2013). « Theoretical principles in inter-urban simulation models : a comparison ». In : *Environment and Planning A* 45, p. 2243–2260.
- RACINE, J.B. (1993). *La ville entre Dieu et les hommes*. Paris : Anthropos.
-

- RAVENSTEIN, E.G. (1885). « The laws of migration ». In : *Journal of the Statistical Society of London* 48.2, p. 167–235.
- REED, W.J. (2002). « On the Rank-Size Distribution for Human Settlements ». In : *Journal of Regional Science* 42.1, p. 1–17.
- REILLY, W.J. (1931). *The law of retail gravitation*. New York : Knickerbocker Press.
- RENFREW, C. (1975). « Trade as action at a distance : questions of integration and communication ». In : *Ancient Civilization and Trade*. A. Sabloff & CC Lamberg-Karlovsky. Albuquerque : University of New Mexico Press, p. 3–59.
- RENFREW, C. et J.F. CHERRY (1986). *Peer polity interaction and socio-political change*. Sous la dir. de Renfrew C. & Cheery J.F. Cambridge : Cambridge University Press.
- RENFREW, C. et T. POSTON (1979). « Discontinuities in the endogenous change of settlement pattern ». In : *Transformations : Mathematical approaches to culture change*. Sous la dir. de C. RENFREW et K. L. COOKE. Academic Press, p. 437–461.
- REUILLON, R., F. CHUFFART et al. (2010). « Declarative task delegation in OpenMOLE ». In : *2010 International Conference on High Performance Computing and Simulation (HPCS)*. IEEE, p. 55–62.
- REUILLON, R., M. LECLAIRE et S. REY-COYREHOURCQ (2013). « OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models ». In : *Future Generation Computer Systems*.
- REY COYREHOURCQ, S. (2014). « Une démarche intégrée pour la construction et la validation de modèles en géographie : SimProcess ». Thèse de doct. Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne.
- REYMOND, H. (1981). « Une problématique théorique de la géographie : plaidoyer pour une chorotaxie expérimentale ». In : *Problématiques de la Géographie*. Presses Universitaires de France. Paris : Isnard H., Racine JB. et Reymond H.
- ROBSON, B.T. (1973). *Urban growth : An approach*. Methuen. London.
- ROMER, P M (1986). « Increasing returns and long-run growth ». In : *The Journal of Political Economy*, p. 1002–1037.
- RONCAYOLO, M. (1997). *La ville et ses territoires*. Paris : Gallimard.
- SAINT JULIEN, T. (1985). *La diffusion spatiale des innovations*. Montpellier : GIP RECLUS, 40p.
- SALTELLI, A., K. CHAN, E. SCOTT et al. (2000). *Sensitivity analysis*. T. 134. Wiley New York.
- SANDERS, L. (1992). *Systèmes de Villes et Synergétique*. Paris : Anthropos.
- (2005). « Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM ». In : *SAGEO 2005, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale*. Avignon : Collection : Actes Avignon.

-
- SANDERS, L. (2006). « Les modèles agent en géographie urbaine ». In : *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*. Hermès-Lavoisier, p. 151–168.
- (2007). « Agent models in urban geography ». In : *Multi-Agent Modelling and Simulation in the Social and Human Sciences*. Sous la dir. de Phan D. et Amblard F. Oxford : Bardwell Press, p. 147–167.
- (2010). « Les villes comme agents : simulation des futurs possibles du système urbain européen ». In : *Nouvelles perspectives en sciences sociales* 5.2, p. 153–180.
- (2012). « Regards croisés de géographes, économistes et archéologues sur la hiérarchie des systèmes de peuplement : de l'empirie aux systèmes complexes ». In : *Région et Développement* 36, p. 127–146.
- SANDERS, L. et al. (1997). « SIMPOP : a multiagent system for the study of urbanism ». In : *Environment and Planning B* 24, p. 287–306.
- SARGENT, R.G. (2005). « Verification and validation of simulation models ». In : Orlando, Florida : Winter Simulation Conference, p. 130–143.
- SAVAGE, S.H. (1997). « Assessing departures from log-normality in the rank-size rule ». In : *Journal of archaeological Science* 24.3, p. 233–244.
- SCHAFFAR, A. (2012). « Les Lois De Zipf Et De Gibrat Pour Les Villes : Une Introduction ». In : *Region et Développement* 36, p. 5–10.
- SCHMITT, C. (2008). « Expérimentation d'une méthode pour la validation d'un modèle multi-agents : L'exemple du modèle SimPop2 appliqué à l'évolution des villes d'Europe entre 1300 et 2000 (simulation géo-référencée) ». Mémoire d'ingénieur. Agrocampus-Ouest.
- SCHMITT, C. et D. PUMAIN (2013). « Modélographie multi-agents de la simulation des interactions sociétés-environnement et de l'émergence des villes ». In : *Cybergeog* 643.
- SCHMITT, C., R. REUILLON et al. (submitted). « Half a billion simulations : Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model ». In : *Environnement and planning B*.
- SCHUMPETER, J.A. (1939). *Business cycles : a theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process*. New York : McGraw-Hill.
- SIMON, H.A. (1955). « On a class of skew distribution functions ». In : *Biometrika* 42.3/4, p. 425–440.
- SIMONS, D., M. ECHENIQUE et J. BATES (1999). *Review of land-use/transport interaction models*. DETR.
- SMITH, M.E. (2005). « City size in late postclassic Mesoamerica ». In : *Journal of Urban History* 31, p. 403–434.
- SOLLA PRICE, D. de (1976). « A general theory of bibliometric and other cumulative advantage processes ». In : *Journal of the American Society for Information Science* 27.5, p. 292–306.
-

- SOLOMATINE, D.P., Y.B. DIBIKE et N. KUKURIC (1999). « Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques ». In : *Hydrological Sciences Journal* 44.6, p. 879–894.
- SOO, K.T. (2005). « Zipf's Law for cities : a cross-country investigation ». In : *Regional Science and Urban Economics* 35.3, p. 239–263.
- SPENCE, N. et B. LINNEKER (1994). « Evolution of the motorway network and changing levels of accessibility in Great Britain ». In : *Journal of Transport Geography* 2.4, p. 247–264.
- STEWART, J.Q. (1947). « Empirical mathematical rules concerning the distribution and equilibrium of population ». In : *Geographical Review* 37.3, p. 461–485.
- STONEDAHL, F. (2011). « Genetic Algorithms for the Exploration of Parameter Spaces in Agent-Based Models ». Thèse de doct. Northwestern University of Illinois.
- STONEDAHL, F. et U. WILENSKY (2010). « Evolutionary robustness checking in the artificial Anasazi model ». In : *Proceedings of the AAAI fall symposium on complex adaptive systems : Resilience, robustness, and evolvability*.
- STUDENY, C. (1995). *L'invention de la vitesse : France, XVIIIe-XXe siècle*. Gallimard.
- SWERTS, E. et D. PUMAIN (2013). « Approche statistique de la cohésion territoriale : le système de villes en Inde ». In : *L'Espace géographique* 1, p. 77–92.
- TAYLOR, P.J. (1971). « Distance transformation and distance decay functions ». In : *Geographical Analysis* 3.3, p. 221–238.
- TESTART, A. (2012). *Avant l'histoire : L'évolution des sociétés, de Lascaux à Carnac*. Paris : Gallimard, Bibliothèque des sciences humaines.
- THÉVENIN, T. (déc. 2010). « Transport – Espace - Temps : Regard croisé entre Time Geography et Geohistoire ». HDR. Université de Bourgogne.
- THOMAS, I. et al. (2010). « Clustering patterns of urban built-up areas with curves of fractal scaling behaviour ». In : *Environment and planning. B* 37.5, p. 942.
- THÜNEN, J. H. von (1966). *Isolated state : an English edition of Der isolierte Staat*. Oxford/New York : Pergamon Press.
- TIMMERMAN, H. (2003). « The saga of integrated land use-transport modeling : how many more dreams before we wake up ? » In : *Keynote paper, Moving through nets : The Physical and social dimension of travel, 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerna, www. ivt. baug. ethz. ch/allgemein/pdf/timmermans.pdf*.
- TOBLER, W. (1970). « A computer movie simulating urban growth in the Detroit region ». In : *Economic geography* 46, p. 234–240.
- (1995). « Migration : Ravenstein, thornthwaite, and beyond ». In : *Urban Geography* 16.4, p. 327–343.
- TURCHIN, P. (2003). *Historical Dynamics : Why States Rise and Fall*. Princeton University Press. ISBN : 0691116695.

-
- ULLMAN, E.L. et R.R. BOYCE (1980). *Geography as spatial interaction*. University of Washington Press Seattle, WA.
- VERHULST, P.F. (1838). « Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement ». In : *Corr. Math. et Phys* 10, p. 113–121.
- VICKERMAN, R., K. SPIEKERMANN et M. WEGENER (1999). « Accessibility and economic development in Europe ». In : *Regional studies* 33.1, p. 1–15.
- WEIDLICH, W. et G. HAAG (1988). *Interregional migration : Dynamic theory and comparative analysis*. Springer-Verlag, Berlin.
- WEST, G.B. et J.H. BROWN (2004). « Life's universal scaling laws ». In : *Physics today* 57.9, p. 36–43.
- WEST, G.B., J.H. BROWN et B.J. ENQUIST (1997). « A general model for the origin of allometric scaling laws in biology ». In : *Science* 276.5309, p. 122–126.
- WHITE, R.W. (1978). « The Simulation of Central Place Dynamics : Two-Sector Systems and the Rank-Size Distribution ». In : *Geographical Analysis* 10.2, p. 201–208.
- WHITLEY, D., S. RANA et R. HECKENDORN (1997). « Island model genetic algorithms and linearly separable problems ». In : *Evolutionary Computing*, p. 109–125.
- WILKINSON, T.J. et al. (2007). « Urbanization within a Dynamic Environment : Modeling Bronze Age Communities in Upper Mesopotamia ». In : *American Anthropologist* 109.1, p. 52–68.
- WILSON, A. (1967). « A statistical theory of spatial distribution models ». In : *Transportation research* 1.3, p. 253–269.
- (1969). « The use of entropy maximising models, in the theory of trip distribution, mode split and route split ». In : *Journal of Transport Economics and Policy*, p. 108–126.
- WILSON, A.G. (2010). « Entropy in urban and regional modelling : retrospect and prospect ». In : *Geographical Analysis* 42.4, p. 364–394.
- XIE, F. et D. LEVINSON (2009). « Modeling the growth of transportation networks : a comprehensive review ». In : *Networks and Spatial Economics* 9.3, p. 291–307.
- YULE, G.U. (1925). « A mathematical theory of evolution, based on the conclusions of Dr. JC Willis, FRS ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character* 213, p. 21–87.
- ZELINSKY, W. (1971). « The hypothesis of the mobility transition ». In : *Geographical review*, p. 219–249.
- ZIPF, G.K. (1949). *Human behavior and the principle of least effort : an introduction to human ecology*. Cambridge (Mass.) : Addison-Wesley Press.
- ZITZLER, E. et L. THIELE (1998). « Multiobjective optimization using evolutionary algorithms—A comparative case study ». In : *Parallel Problem Solving from Nature—PPSN V*. Springer, p. 292–301.
-

Liste des tableaux

1.1	Évolution (1900-2000) de la hiérarchisation des systèmes de villes européen, indien, étasunien et sud-africain	43
3.1	Les paramètres d'état du modèle SimpopLocal	167
4.1	État des lieux du paramétrage du modèle SimpopLocal avant son calibrage	184
4.2	Les paramètres de l'algorithme évolutionnaire implémenté	197
4.3	Paramétrages identifiés par l'application de la procédure de calibrage automatisée du modèle SimpopLocal et leurs scores sur les trois objectifs de calibrage	201
4.4	Comparaison du domaine d'exploration de l'algorithme de calibrage et du domaine de variation dans le front de Pareto des paramètres de SimpopLocal	203
4.5	Paramétrage du modèle SimpopLocal pour la simulation interprétée	209
4.6	Comparaison du domaine d'exploration possible, du domaine de variation dans le front de Pareto et du domaine de validité du calibrage des 5 paramètres libres du modèle SimpopLocal	234
5.1	Coefficients de variation (en %) des vitesses de liaison entre Paris et les principales villes de provinces	253
5.2	Les différences de vitesses de chaque niveau hiérarchique du réseau de transport modélisé en fonction de l'évolution réelle des vitesses de circulation . .	284
5.3	Les paramètres d'état du modèle SimpopNet	293

5.4	Les quatre paramétrages de SimpopNet pour les deux expérimentations réalisées	299

Table des figures

1	Deux régimes de croissance de système de villes sous la contrainte d'accès aux ressources	26
1.1	Évolution de la pente de la droite d'ajustement de la distribution rang-taille du système de villes français entre 1831 et 1982	43
1.2	Évolution (1954-1999) de la pente d'ajustement de la distribution rang-taille des villes françaises selon deux méthodes de définition des délimitations de la ville	44
1.3	Répartition des aires urbaines selon leur type d'évolution et leur taille en 1999	45
1.4	Application de la théorie des lieux centraux à des cas historiques d'organisation spatiale de systèmes de peuplement	46
1.5	Variation de l'intensité des interactions en fonction de la distance suivant deux fonctions de frein de la distance	50
1.6	Diffusion et substitution des cycles d'innovation dans le système de villes .	60
1.7	Diversité économique et taille urbaine	62
1.8	Trajectoires des grandes aires urbaines françaises en fonction de leur spécialisation économique (1962-1990)	64
1.9	Évolution de la population urbaine et du taux d'urbanisation des pays anciennement industrialisés (1300-1990)	71
1.10	Deux régimes de dynamique de concentration de la population dans les villes	73

2.1	Relation caractéristique des modèles de type <i>Henderson</i> entre le gain net d'agglomération et la taille démographique	98
2.2	Arbre généalogique des modèles de la famille Simpop	104
2.3	Évolution d'un système de villes simulé par le modèle Simpop	107
2.4	Schématisation de la modélographie de la simulation du processus de hiérarchisation des systèmes de villes	110
2.5	Protocole de validation de modèle multi-agents proposé par NGO et SEE (2011)	119
2.6	Une nouvelle démarche de modélisation et d'évaluation de modèles multi-agents	124
2.7	Le formalisme graphique de OpenMOLE	127
3.1	Comparatif des approches de modélisation des six modèles sélectionnés . .	148
3.2	Classification des approches de modélisation des six modèles sélectionnés .	150
3.3	Création et transmission des attributs des agents innovation	158
3.4	Schématisation de l'impact de l'acquisition successive d'innovations sur l'évolution de la population d'un point de peuplement	160
3.5	Évolution de la probabilité d'apparition de l'innovation dans un point de peuplement en fonction de la taille démographique de ce point de peuplement	162
3.6	Configuration initiale utilisée pour toutes les séries d'expérimentation sur le modèle SimpopLocal	169
3.7	Diagramme général d'activité du modèle SimpopLocal	170
3.8	Diagramme d'activité complémentaire (A) du modèle SimpopLocal	171
3.9	Diagramme d'activité complémentaire (B) du modèle SimpopLocal	172
4.1	Variation de la dispersion de l'évaluation de l'objectif de population sur 100 séries en fonction du nombre de réplifications par série	193
4.2	Schématisation d'un front de Pareto	195
4.3	Évolution de l'hypervolume délimité par le front de Pareto et la convergence de l'algorithme évolutionnaire sous la contrainte de 3 objectifs	199
4.4	Évolution de la distribution Rang-Taille des points de peuplement pendant une simulation d'un des meilleurs paramétrages calibrés	204
4.5	Variabilité de la distribution finale Rang-Taille des points de peuplement sur 100 simulations d'un des meilleurs paramétrages calibrés	205

4.6	Cartographie du système de points de peuplement à l'état initial et à l'état final	210
4.7	Ajustement linéaire des pentes des distributions rang-taille des points des peuplement du système à l'initialisation et en fin de simulation	210
4.8	Évolution de la population totale du système au cours de la simulation . .	212
4.9	Évolutions des nombres d'innovations créées et diffusées au cours de la simulation	212
4.10	Résultats de la classification ascendante hiérarchique sur les trajectoires des points de peuplement lors d'une simulation du modèle SimpopLocal . .	214
4.11	Trajectoires des points de peuplement par classes lors d'une simulation du modèle SimpopLocal	215
4.12	Profil de calibrage du paramètre r_{growth} du modèle SimpopLocal	222
4.13	Profil de calibrage du paramètre <i>InnovationLife</i> du modèle SimpopLocal .	224
4.14	Profil de calibrage du paramètre R_{max} du modèle SimpopLocal	226
4.15	Profil de calibrage du paramètre <i>InnovationImpact</i> du modèle SimpopLocal	227
4.16	Deuxième profil de calibrage du paramètre <i>InnovationImpact</i> du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)	228
4.17	Profil de calibrage du paramètre $P_{creation}$ du modèle SimpopLocal	228
4.18	Deuxième profil de calibrage du paramètre $P_{creation}$ du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)	229
4.19	Profil de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ du modèle SimpopLocal	230
4.20	Deuxième profil de calibrage du paramètre $P_{diffusion}$ du modèle SimpopLocal (exploration plus ciblée)	231
4.21	Profil de calibrage du paramètre <i>DistanceDecay</i> du modèle SimpopLocal .	232
5.1	Diffusion hiérarchique de l'innovation ferroviaire en France : évolution du taux de desserte des villes par classe de tailles	250
5.2	La réduction du nombre d'étapes sur le trajet Lyon-Avignon entre 1765 et 2002	251
5.3	Cartes <i>froissées</i> de l'autoroute et du TGV en France selon une échelle distance-temps	252
5.4	Schématisation de la coévolution entre réseau de transport et système de villes	255

5.5	Ensemble des conditions nécessaires pour que l'investissement local dans les infrastructures de transports conduise à un développement économique local	258
5.6	Typologie des impacts possibles de l'investissement dans le secteur des transports en fonctions du contexte politico-économique à l'échelle régionale	259
5.7	Corrélation entre le taux de variation de la population des villes Françaises et leur taille de 1831 à 1982	260
5.8	Deux schématisations possibles de la coévolution entre taille urbaine et accessibilité	261
5.9	Évolution d'accessibilité d'un réseau à un autre, taille moyenne et taux de variation moyen annuel	263
5.10	Les enjeux de modélisation du modèle SimpopNet	266
5.11	Méthodes d'évaluation des retombées économiques de grands investissements dans les transports	268
5.12	Résultats de simulation des modèles de croissance de réseau avec contrainte de GASTNER et NEWMAN (2006)	275
5.13	Typologie des modèles d'interaction transport - usage du sol (modèle LUTI)	278
5.14	Trois hypothèses à tester par la simulation sur les relations entre taille et accessibilité urbaine à l'échelle micro-géographique	282
5.15	Évolution de la vitesse moyenne des grandes liaisons régulières entre Paris et les principales villes de province de 1800 et 2000 et détermination des vitesses simulées	283
5.16	Les mécanismes du modèle SimpopNet	285
5.17	État initial et état final du réseau interurbain tel qu'il a été défini dans le mécanisme <i>scenario-network</i>	288
5.18	Évolution du taux de croissance moyen du système de villes en fonction des paramètres β et λ	290
5.19	État initial du modèle SimpopNet	292
5.20	Diagramme général d'activité du modèle SimpopNet	295
5.21	Diagrammes d'activités complémentaires du modèle SimpopNet	296
5.22	Deux expérimentations pour le prototype SimpopNet	297
5.23	Comparaison de la hiérarchisation finale du système urbain engendrée par trois modèles de croissance urbaine (200 pas de simulation)	302

5.24	Effet du paramètre β (pondération de l'effet de la distance) sur la hiérar- chisation du système urbain	303
5.25	cartographie de l'état final de la simulation de la boucle complète de co- évolution (<i>myseed</i> = 31) du modèle SimpopNet	304
5.26	Évolution de l'indice de corrélation entre la population et l'indice de Shim- bel des villes	305
C.1	Procédure de répartition spatiale pseudo-christalérienne des tailles de villes	357
C.2	Procédure de création d'un réseau de communication interurbain reflétant la distribution spatiale pseudo-christalérienne des tailles de villes	358
C.3	Code source de la procédure d'initialisation du modèle SimpopLocal	359

Résumé

L'évolution des villes est-elle le résultat de leurs multiples interactions? C'est sur ce postulat que s'appuie la théorie évolutive urbaine (PUMAIN, 2000) pour analyser les processus de croissance des villes. Cette thèse, réalisée dans un contexte inter-disciplinaire, vise à évaluer la validité d'une telle hypothèse par la simulation informatique. Pour mener à bien ce projet, les savoirs accumulés sur la dynamique des systèmes de villes sont d'abord rassemblés afin d'en extraire les grandes caractéristiques, synthétisées sous la forme de dix faits stylisés majeurs. Deux modèles de simulation, SimpopLocal et SimpopNet, sont ensuite construits, documentés de manière standardisée, et enfin explorés de manière systématique. Ces modèles interrogent chacun un aspect précis de la théorie évolutive urbaine : la nature des interactions interurbaines pour le premier (i.e. la compétition pour l'innovation) et leur support pour le second (i.e. le rôle de la structure des réseaux de communication). Les besoins associés à leur nécessaire évaluation ont guidé la conception et la mise en œuvre de deux protocoles d'explorations systématiques inédits : une méthode de calibrage automatisée, et un protocole d'analyse de sensibilité (*the Exploration Profile algorithm*) qui évalue individuellement la contribution de chaque mécanisme aux comportements simulés. Ces deux formes d'exploration confrontent de façon systématique les résultats de simulation avec les connaissances actuelles. Elles montrent que ces modèles sont capables de rendre compte de processus clés de la dynamique des systèmes des villes, tels que leur hiérarchisation, et prouvent pour la première fois la nécessité de mécanismes d'interactions interurbaines pour simuler des croissances proches des évolutions de systèmes réels.

Mots clés : théorie urbaine, système de villes, croissance urbaine, modèle de simulation multi-agents, protocole d'évaluation, SimpopLocal, SimpopNet.

Abstract

Is urban growth the result of multiple interactions between cities? Urban evolutionary theory (PUMAIN, 2000), based on this postulate, analyses urban growth processes. This thesis, undertaken in an inter-disciplinary context, aims to evaluate the validity of the hypothesis by means of computer simulation. Strong regularities of the urban systems dynamics are extracted from the accumulated scientific knowledge and synthetized into ten major stylized facts. Two simulation models, SimpopLocal and SimpopNet, are then built, documented - thanks to a standardized grid - and systematically explored. They each question a specific aspect of the urban evolutionary theory : the nature of the inter-urban interactions for the first model (i.e. competition for innovation) and their support for the second model (i.e. the role of the communication network structure). The evaluation of the two models required the design and the implementation of two original exploration protocols : an automated calibration method and a sensibility analysis protocol (*the Exploration Profile algorithm*) which individually evaluates the contribution of each implemented mechanism to the simulated behavior. These two forms of exploration systematically confront the simulation results with current scientific knowledge. They indicate that the two models are able to account for key processes of urban systems dynamics, such as their hierarchical organization, and demonstrate for the first time the need for interurban interaction mechanisms in order to simulate urban evolutions that are close to those observed on real urban systems.

Keywords : urban theory, systems of cities, urban growth, multi-agent simulation models, evaluation protocol, SimpopLocal, SimpopNet.