



HAL
open science

Analyse et simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines de l'échelle micro-locale à l'échelle régionale - Modèles multi-échelles et trans-échelles

Cécile Tannier

► **To cite this version:**

Cécile Tannier. Analyse et simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines de l'échelle micro-locale à l'échelle régionale - Modèles multi-échelles et trans-échelles. Géographie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2017. tel-01668615

HAL Id: tel-01668615

<https://hal.science/tel-01668615v1>

Submitted on 5 Jan 2018

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.

Analyse et simulation de la concentration et de la
dispersion des implantations humaines de l'échelle
micro-locale à l'échelle régionale
Modèles multi-échelles et trans-échelles

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches de :

Cécile Tannier

Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249 CNRS - Université Bourgogne Franche-Comté

Soutenue le 12 décembre 2017

Devant un jury composé de :

Jean-Christophe FOLTETE, professeur de géographie, Université Bourgogne Franche-Comté

Pierre FRANKHAUSER, professeur de géographie, Université Bourgogne Franche-Comté

Claude GRASLAND, professeur de géographie, Université Paris 8 Diderot

Denise PUMAIN, professeure de géographie émérite, Université Paris 1 Sorbonne

Lena SANDERS, directrice de recherche CNRS, UMR Géographie-cités, Paris

Franck VARENNE, maître de conférence HdR en philosophie (épistémologie), Université de Rouen

Sommaire

Introduction	p. 4
Chapitre 1. Socle théorique et conceptuel pour des modèles géographiques de concentration et de dispersion des implantations humaines	p. 8
1. Principes fondamentaux et lois dans les modèles de dispersion et de concentration des implantations humaines	p. 9
1.1 Trois principes fondamentaux	p. 10
1.2 Cinq lois	p. 11
2. Les systèmes de peuplement : dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines à différentes échelles	p. 16
3. Intégration du contenant spatial et du contenu social des lieux	p. 22
4. A propos de la dépendance d'échelles	p. 25
4.1 Observer et modéliser les phénomènes à plusieurs échelles	p. 25
4.2 Interactions entre entités élémentaires et configurations socio-spatiales émergentes	p. 26
5. Conclusion du chapitre 1	p. 28
Chapitre 2. Simulation de dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines : étude de trois modèles dans leur rapport à la théorie et à l'empirique	p. 29
1. Description synthétique des trois modèles	p. 31
1.1 Entités modélisées	p. 31
1.2 Dynamiques à l'œuvre	p. 34
2. Confrontation de l'ontologie du domaine du modèle avec l'ontologie du domaine conceptuel	p. 38
2.1 Interactions agents-environnement et influences exogènes	p. 39
2.2 L'émergence dans les trois modèles	p. 41
3. Rapports aux domaines empirique et conceptuel pour la conception des trois modèles	p. 42
3.1 La phase de modélisation	p. 43

3.2 Paramétrage, évaluation et validation des trois modèles	p. 52
<i>Paramétrage, évaluation et validation de MobiSim-DR</i>	
<i>Paramétrage, évaluation et validation de MobiSim-MR</i>	
<i>Paramétrage, évaluation et validation de SimFeodal</i>	
4. Analyse et interprétation des résultats de simulation	p. 80
4.1 Étude de cinq scénarios simulés avec MobiSim-DR	p. 80
4.2 Étude de trois scénarios simulés avec MobiSim-MR	p. 87
4.3 Étude d'un scénario simulé avec SimFeodal	p. 99
4.4 Synthèse des analyses	p. 106
5. Rôle et objectif de la simulation pour chacun des modèles	p. 107
5.1 Fonctions épistémiques de chaque modèle	p. 108
5.2 Apport spécifique de la simulation multi-agents	p. 110
6. Conclusion du chapitre 2	p. 112
Chapitre 3. Variation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines à travers les échelles : modèles mono- et multifractals	p. 114
1. De l'observation d'invariances d'échelles aux méthodes d'analyse fractale	p. 114
1.1 Invariance d'échelles, lois de puissance et auto-similarité : quelques définitions	p. 114
<i>Invariance d'échelles</i>	
<i>Auto-similarité et fractalité</i>	
1.2 Méthodes d'analyse fractale	p. 121
<i>Estimation de dimensions fractales</i>	
<i>Extraction de l'enveloppe morphologique des agglomérations urbaines au moyen d'une approche fractale</i>	
<i>Spectre multifractal et dimensions généralisées : caractérisation quantitative du MAUP (Modifiable Areal Unit Problem)</i>	
2. Intérêts et limites des analyses fractales de la concentration et de la dispersion des implantations humaines : quelques illustrations	p. 134
2.1 Typologie de distributions spatiales en fonction de leur spectre multifractal	p. 134
2.2 L'existence d'invariances d'échelles dans la concentration locale des implantations humaines : une hypothèse simplificatrice ou une réalité mesurable ?	p. 137
2.3 Caractérisation de la limite morphologique des agglomérations urbaines	p. 141
<i>La Belgique, un continuum bâti ?</i>	

Y a-t-il un effet régional (différence entre Flandre et Wallonie) ou bien de taille de ville sur la morphologie des dix-huit plus grandes agglomérations urbaines belges ?

Comparaison des textures bâties locales et de la forme de l'enveloppe morphologique de vingt agglomérations urbaines françaises

2.4 Hypothèses quant à l'évolution de la fractalité des villes au cours du temps p. 146

3. Modèles fractals d'urbanisation : l'auto-similarité au service de l'aménagement urbain p. 149

3.1 Éléments de réflexion concernant les implications fonctionnelles de formes urbaines fractales p. 150

Forme du contour des agglomérations urbaines

Proximité des lieux de résidence aux commerces, services et espaces verts et naturels

Réponse aux attentes de la population

Préservation de la biodiversité

Normes fractales d'aménagement

3.2 MUP-City : simulation d'un développement résidentiel fractal sous contraintes d'accessibilité p. 157

3.3 Fractalopolis : conception de plans multifractals de développement urbain p. 165

4. Conclusion du chapitre 3 p. 175

Conclusion p. 176

Références bibliographiques p. 179

Introduction

Ce mémoire concerne l'analyse de la configuration spatiale des implantations humaines ainsi que des processus qui amènent à leur évolution, considérant des zones d'étude urbaines ou régionales. L'objet d'analyse relève donc à la fois de la *forme* des implantations humaines et du *fonctionnement* des hommes (individus, groupes) dans leur(s) territoire(s).

Une implantation humaine consiste en la matérialisation dans l'espace, l'inscription physique, d'une ou plusieurs activités humaines. Elle se caractérise par un certain degré de pérennité. Il peut s'agir d'un bâtiment, d'un groupe de quelques bâtiments, ou d'un ensemble plus vaste de milliers de bâtiments. Chaque bâtiment est le siège d'une ou plusieurs fonctions : résidentielles, commerciales, industrielles, artisanales, religieuses, politiques, logistiques... Il s'inscrit dans un environnement non bâti plus ou moins artificialisé (parcs, parkings, vergers, champs...). Il est relié à d'autres bâtiments, proches ou éloignés, de même fonction ou de fonction différente, au moyen de réseaux de transport et de communication. Tout ceci –bâtiments, environnement non bâti, réseaux– constitue le contenant des activités humaines. Les configurations spatiales de ce contenant, ou formes (*shapes*)¹, sont étudiées dans ce mémoire.

Le contenu associé à ce contenant sont les individus et les groupes effectuant des activités, ayant des pratiques spatiales et des relations sociales. Les configurations spatiales de ce contenu sont étudiées ici en termes de localisations, de flux et de trajectoires de déplacements.

« L'espace en géographie est donc un espace habité et pas uniquement un espace géométrique. En anglais, le terme « space » réfère au contenant (la géométrie) alors que « place » fait référence conjointement au contenant et au contenu qui est composé des individus et des groupes ayant des pratiques spatiales et des relations sociales. Il comprend toute la mémoire du lieu et les réseaux de relations liés à ce lieu. A. Berque (2003) écrit ainsi que les lieux possèdent d'une part une identité physique, strictement localisable dans les limites de leur topos, mais que d'autre part ils existent en fonction de la valeur et du sens dont l'existence humaine les charge au fil de l'histoire, à savoir leur chôra, essentiellement relationnelle et qui engage de nombreuses choses qui échappent à la géométrie. L'espace vécu, le lieu, procurent du sens et des repères identitaires en situant l'individu socialement, économiquement et culturellement, et l'identité individuelle se construit en partie sur un ensemble de routines, d'actions répétées spatialement et temporellement dans l'environnement.

(...) A un niveau d'analyse davantage agrégé, les interactions entre les lieux se manifestent à travers la mobilité de biens, d'informations ou de personnes. Un pays, une région, une ville, ou tout ensemble de lieux en interaction constitue un territoire, c'est-à-dire un espace approprié par une société. En partant de l'espace pour interroger le réel, et singulièrement la société, en rapport avec son support matériel, hérité à la fois de l'action des générations passées et des forces de la nature (Durand-Dastès 1989), la géographie s'abstrait, au

¹ La traduction anglaise de certains mots ou expressions a été ajoutée (en italique dans le texte) quand celle-ci a semblé davantage précise que le mot ou l'expression français(e) correspondant.

moins partiellement, des individualités. C'est pourquoi P. Vidal de la Blache (1913) a pu définir la géographie comme « la science des lieux et non celle des hommes », quand bien même les lieux contiennent des hommes qui, aussi bien individuellement qu'en groupe, s'inscrivent et fonctionnent dans des espaces, et les marquent. L'analyse géographique intègre à la fois les relations homme-milieu (ou nature-société) et les relations entre acteurs sociaux quand elles amènent, directement ou indirectement, une modification des configurations spatiales des lieux (contenant et contenu, les deux évoluant conjointement) » (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio sous presse).

Les configurations spatiales du contenant et du contenu d'un territoire (région, ville, village, quartier) peuvent être plus ou moins concentrées ou dispersées : tissus bâtis compacts ou diffus, flux migratoires concentrés ou dispersés, densités contrastées de population ou de commerces... Certains aspects du mémoire concernent l'analyse spatiale de ces concentrations et ces dispersions. Concentrations et dispersions sont alors considérées en tant qu'états.

Par ailleurs, le contenant et le contenu d'un territoire évoluent conjointement. D'autres aspects du mémoire concernent la modélisation des phénomènes desquels résultent la dynamique des configurations spatiales du contenant et du contenu, et la mise à l'épreuve des modèles par la simulation. Concentrations et dispersions sont alors considérées en tant que processus.

Concentrations et dispersions, considérées en tant qu'états ou bien en tant que processus, varient selon le niveau d'agrégation des entités considérées (Openshaw 1983 ; Fotheringham & Wong 1991 ; Madelin, Grasland, Mathian, Sanders, Vincent 2009) et la résolution spatiale adoptée (Muller 1978 ; Goodchild 1980 ; Toger, Malkinson, Benenson, Czamanski 2016).

La résolution spatiale correspond à la finesse du grain avec laquelle sont représentés les éléments du contenant. Par exemple, le tissu bâti d'une agglomération urbaine peut être cartographié bâtiment par bâtiment, chaque bâtiment ayant son emprise spatiale propre, délimitée avec une grande précision (métrique voire infra-métrique). Dans ce cas, la résolution spatiale est fine. Le même tissu bâti peut être cartographié sous la forme de taches urbaines délimitant *grosso modo* l'enveloppe des différents groupes de bâtiments. Dans ce cas, la résolution spatiale est plus grossière. Un tissu bâti peut aussi être cartographié sous la forme de cellules carrées de 20 m. de côté (résolution spatiale fine) ou de cellules carrées de 200 m. de côté (résolution spatiale plus grossière).

Le niveau d'agrégation des entités analysées ou modélisées est différent de la résolution spatiale. Par exemple, on peut étudier un quartier comme un tout, sans le désagréger, ou bien le considérer comme un agrégat d'îlots ou encore de bâtiments. De la même manière, on peut considérer les mobilités résidentielles à l'échelle des ménages d'une agglomération (analyse désagrégée) ou bien à l'échelle des quartiers (correspondant à un agrégat de ménages) ou encore des communes (niveau d'agrégation plus élevé).

La finesse de la résolution spatiale du contenant détermine en partie le niveau d'agrégation des entités considérées et vice-versa. Imaginons par exemple que l'on veuille étudier la relation entre la forme bâtie (hauteur des bâtiments, type de bâtiments, densité bâtie locale...) et la satisfaction résidentielle des ménages. Si on possède une carte du bâti à résolution spatiale fine et des données individuelles sur la satisfaction résidentielle des ménages, on pourra étudier la relation au niveau du couple bâtiment-ménage. Si en revanche la carte du bâti est à résolution spatiale plus grossière, on devra étudier la relation entre les types d'agrégats bâtis et les groupes de ménages qui y résident. Si maintenant la carte du bâti est à résolution spatiale fine mais que les données sur les ménages sont

agrégées au niveau des IRIS, on devra étudier la relation entre le type de bâti dans chaque IRIS et la satisfaction résidentielle des ménages agrégée au niveau de l'IRIS.

Le parti-pris dans ce mémoire est d'étudier les concentrations et les dispersions, modélisées en tant qu'états ou bien en tant que processus, au moyen de modèles multi- ou trans-échelles². Adopter une approche multi- ou trans-échelles permet de prendre en compte explicitement des hiérarchies spatiales (par exemple, le fait qu'une agglomération urbaine comporte un grand nombre de petits agrégats bâtis, un nombre moins important d'agrégats de taille moyenne et un nombre encore réduit d'agrégats de grande taille) et fonctionnelles (par exemple, différents niveaux de centralité fonctionnelle). Ceci suppose de considérer simultanément plusieurs niveaux d'agrégation (Grasland 2003 ; Sanders 2007) et/ou une série de résolutions spatiales (Goodchild & Mark 1987 ; Lam & Quattrochi 1992) et/ou des portées (voisinages) de tailles différentes (van Vliet, White, Dragicevic 2009 ; White 2005 ; Mathian & Sanders 2014). Une des difficultés est que les données décrivant le contenant à différentes résolutions spatiales, d'une part, et décrivant le contenu à différents niveaux d'agrégation, d'autre part, relèvent bien souvent d'unités spatiales (mailles) différentes : leurs limites ne correspondent pas ; elles peuvent s'intersecter, se chevaucher. Qui plus est, pour un même phénomène considéré à différentes résolutions spatiales ou différents niveaux d'agrégation, les unités spatiales ou mailles ne sont pas forcément emboîtées hiérarchiquement. De ceci découle la nécessité de transformer les données sources selon un modèle conceptuel de données permettant une lecture multi-échelles du phénomène étudié (Plumejeaud, Mathian, Gensel, Grasland 2011).

Les différents aspects de la forme et du fonctionnement des régions et des agglomérations urbaines ne sont pas tous abordés dans ce mémoire. Du point de vue du contenant, les recherches présentées sont centrées sur l'étude des formes des implantations humaines considérant différents niveaux d'analyse, du bâtiment à l'ensemble d'une agglomération urbaine ou d'une région. Les processus de changement sont modélisés en tenant compte à la fois de l'environnement très local de chaque implantation et de voisinages de plus en plus larges. Du point de vue du contenu, la thématique abordée est celle des choix de localisation et des décisions de changements de localisation. Les entités considérées sont diverses : ménages résidant en France à la période contemporaine, foyers paysans et seigneurs de l'Europe du Nord-Ouest au Moyen-Age. Les facteurs de choix et de décision pris en compte sont à la fois individuels (par exemple, revenus, modes de vie...) et collectifs (normes, références collectives...).

Le plan du mémoire ne suit pas une logique de séparation entre contenant et contenu car les deux évoluent conjointement au sein d'une région ou d'une agglomération urbaine. Notamment les facteurs de choix d'une localisation relèvent du lieu (*place*) défini précédemment comme faisant référence conjointement au contenant et au contenu.

Le mémoire comporte trois chapitres. Le premier chapitre propose un socle conceptuel qui permet une étude géographique de la concentration et de la dispersion des implantations humaines à travers les échelles. Ce socle conceptuel est mobilisé dans le deuxième chapitre afin de concevoir des modèles de simulation des processus amenant à la concentration ou à la dispersion des implantations humaines. Le troisième et dernier chapitre est dédié à la présentation et à la critique

2 Le qualificatif « multi-niveau » n'est pas utilisé dans le mémoire car dans la littérature, il désigne une catégorie de modèles statistiques (Mathian & Piron 2001).

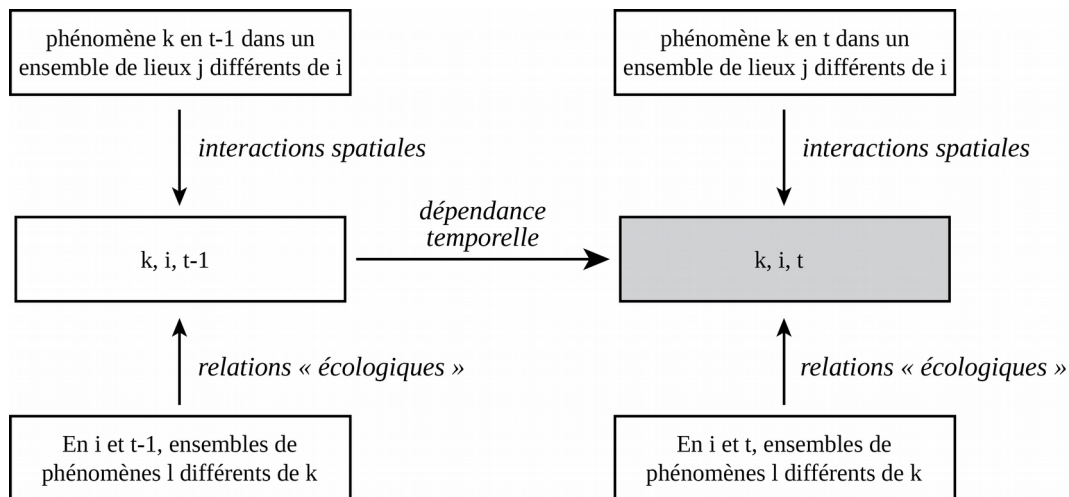
de différents modèles qui permettent d'analyser et de représenter la variation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines à travers les échelles, dont notamment des modèles fractals.

Chapitre 1

Socle théorique et conceptuel pour des modèles géographiques de concentration et de dispersion des implantations humaines

La définition de la géographie adoptée ici est celle proposée par F. Durand-Dastès (1989) : « (...) *la géographie place au premier plan l'organisation de l'espace, son fonctionnement ; elle cherche à expliquer sa diversité ou plutôt sa diversification, aux différentes échelles ; elle pose comme prioritaire la question de la localisation (pourquoi est-ce là et pas ailleurs) ; elle part de l'espace pour interroger le réel, et singulièrement la société, en rapport avec son support matériel, hérité à la fois de l'action des générations passées et des forces de la nature* » (Figure 1). Cette définition amène à se poser trois questions sur les espaces étudiés, qui revêtent autant d'importance les unes que les autres. 1) *L'espace est-il différencié ?* Pour répondre à cette question, on s'attache à identifier et caractériser des différenciations spatiales. 2) *Pourquoi est-il différencié ?* On recherche des explications à ces différenciations. 3) *Pourquoi observe-t-on cette différenciation là et pas une autre ?* On s'efforce alors de distinguer à quel point les explications à ces différenciations sont générales, valables pour différents espaces et/ou différentes périodes dans le temps, ou bien singulières et relevant de spécificités locales.

Figure 1. Questionnement géographique. D'après F. Durand-Dastès (2001a).



Phénomène étudié. On cherche à comprendre pourquoi on observe le phénomène k en un lieu i à un instant t.

« The natural world and the human activities embedded in it are incredibly diverse. The human brain does not deal well with extreme diversity (chaos), but can handle variability.

We [geographers] do this in a spatial sense by searching for locational regularities that can be cognitively categorized and spatially associated so that information can be ordered and communicated. In this way, variability and diversity can be interpreted, and what might otherwise be considered chaos can be comprehended at some scale of organization. Geographic knowledge thus helps us make sense out of chaotic or apparently highly diversified environments » (Golledge 2002).

Concernant la concentration et de la dispersion des implantations humaines, les différenciations spatiales peuvent être étudiées soit en termes de localisations (positions, situations), soit en termes de mouvements et de flux migratoires (changements de localisation). Les caractéristiques différenciées des lieux d'implantation créent et sont créées par les mouvements des entités étudiées. Les configurations spatiales résultantes consistent en des distributions spatiales d'implantations ainsi que des flux ou des trajectoires de migration.

Dans ce mémoire, concentrations et dispersions sont étudiées au moyen de différents types de modèles.

« D'après A. Rey (2010), le mot « modèle » viendrait de l'italien modello comme emprunt à la Renaissance du langage des arts, désignant quelque chose qui est destiné à être reproduit, notamment en peinture et sculpture. Ce terme a ensuite pris le sens de représentation, que l'on retrouve dans la notion de modèles réduits, puis, par un glissement de sens, le mot a plus tard désigné un « système représentant les structures essentielles d'une réalité ». Ce sens est avéré en anglais dès le début du XXe siècle. Il associe la modélisation à une entreprise de simplification, laquelle pose une question cruciale : quelles sont les structures et les interactions essentielles et celles qui ne le sont pas ? Différents auteurs ont complété cette définition en y ajoutant l'idée d'objectif présidant à la construction du modèle : pour P. Haggett (1965) « Un modèle est une représentation schématique de la réalité élaborée en vue d'une démonstration » ; pour F. Durand-Dastès (2001b) « Un modèle est une représentation schématique de la réalité, élaborée en vue de la comprendre et de la faire comprendre ». Sans énoncer explicitement qu'un modèle implique nécessairement une simplification, d'autres définitions insistent sur le fait qu'un modèle est une construction pour étudier un objet et non une représentation de l'objet d'étude lui-même. Ainsi pour M. Minsky (1965): « Pour un observateur B, un objet A est un modèle de l'objet A s'il permet à B d'utiliser A* pour répondre à des questions intéressantes sur A », et pour J.-M. Legay (1997) : « Un modèle est une construction qui permet de répondre à une question sur un objet ». L'objet d'étude modélisé peut dans ce cas être un fait réel ou quelque chose de plus abstrait, par exemple un programme informatique. Toutes ces définitions d'un modèle sont compatibles entre elles, et compatibles également avec celle que nous proposons maintenant pour y adosser notre réflexion : un modèle est une construction qui mobilise une ou plusieurs théories pour répondre à une question sur un objet » (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio 2017).*

1. Principes fondamentaux et lois dans les modèles de dispersion et de concentration des implantations humaines

L'observation et la modélisation de la distribution spatiale des implantations humaines et des migrations associées est possible car les lieux ne sont pas tous différenciés les uns des autres. En

termes de processus, M. Goodchild (2016) l'exprime ainsi : « *Smoothing processes dominate sharpening processes* » et « *Processes that differentiate the landscape are weaker than processes that smoothen the landscape* ». De plus, en raison de leur matérialité spatiale, les implantations humaines sont relativement pérennes sur une durée d'une année, voire de plusieurs années. Ceci marque leur différence vis-à-vis d'autres phénomènes de concentration et de dispersion davantage éphémères (congestion routière, fréquentation de lieux touristiques...).

Notre parti-pris est de considérer que les principes fondamentaux à la base des modèles pour l'analyse spatiale de la concentration et de la dispersion des implantations humaines sont les mêmes que pour la simulation spatiale des processus de concentration et de dispersion. Ce faisant, les principes qui déterminent la localisation (position, situation) des implantations ne sont pas distingués *a priori* de ceux qui déterminent les changements de localisation (trajectoires migratoires, flux). Les interactions entre les lieux, qu'ils soient de fréquentation ou d'implantation, déterminent à la fois l'intérêt de chaque lieu pour chaque type d'implantation et l'intérêt des changements de lieu d'implantation, ce qu'exprime ainsi C. Grasland (2010) : « *The crucial discovery of Tobler is the fact that positions and interactions can be analyzed in a symmetrical way through the concepts of movements and accessibility. (...) the division of spatial analysis between analysis of location and analysis of interaction is certainly useful for pedagogical reasons (...) but it can be also an obstacle for deep understanding of linkage between positions, distances and interactions* ». Ceci rejoint l'idée, mise en avant par Galton & Mizoguchi (2009), d'interdépendance mutuelle entre d'un côté, la matière et les d'objets et de l'autre, les événements et les processus : « *In this paper we advance the view that neither of matter/object nor process/event is ontologically prior to the other; but rather, each is dependent on the other* ». Ainsi, la connaissance des formes (c'est-à-dire les concentrations et dispersions d'implantations analysées en tant qu'états) aide à la connaissance des processus de concentration et de dispersion, et vice-versa.

1.1 Trois principes fondamentaux

Le premier principe est celui de **minimisation de l'énergie utilisée pour les échanges et les déplacements**, étudié par G. Zipf (1949) sous l'intitulé de principe du moindre effort. Dans de nombreux cas, ce principe recouvre la notion d'optimisation, par exemple l'optimisation de la localisation d'une activité pour minimiser les coûts de transport ou l'optimisation de la forme d'une bordure (lisière, frontière) pour maximiser les échanges entre deux ensembles de lieux.

« Le modèle explicatif de processus propre à Zipf suppose qu'il y a deux tendances contraires et à base psychologique qui président à la dispersion ou au regroupement des implantations humaines. Ces tendances relèvent toutes deux du principe du « moindre effort ». Il y a d'une part la tendance à la diversification des lieux d'implantation : elle a pour effet de minimiser la difficulté de mouvoir les matériaux bruts extraits de la terre (essentiellement au départ des produits de l'agriculture). Il y a d'autre part la tendance à l'unification qui a pour effet de minimiser la difficulté de mouvoir des produits élaborés lors de leur transfert vers la population qui en fera la consommation. Ainsi, la force de diversification travaille dans le sens d'un plus grand nombre de petites communautés alors que la force d'unification travaille dans le sens d'un nombre restreint de grandes communautés (Zipf, 2012-1949, p. 359) » (Varenne 2016).

Le deuxième principe est celui de **concurrence** (ou de **compétition**) dont font l'objet les lieux de l'espace terrestre. Il s'agit d'une concurrence entre individus ou groupes d'individus pour l'occupation du sol, pour l'accès aux ressources, pour l'accès à la clientèle... L'intensité de ce processus varie en fonction de la situation géographique des lieux et de leurs autres caractéristiques. Selon les cas, il en résulte un éloignement (dispersion) ou bien un rapprochement (concentration) d'implantations humaines de même type ou de types différents.

Le troisième principe est celui de **complémentarité** (ou de **coopération**, de **congruence**) entre les lieux, entre les activités, entre groupes sociaux... Il peut en résulter à la fois un rapprochement (concentration) d'implantations humaines de même type ou de types différents, par exemple le rapprochement d'une offre et d'une demande, ou bien un éloignement (dispersion), par exemple pour offrir un produit ou mener une activité en un lieu et, concomitamment, offrir un autre produit ou mener une autre activité en un autre lieu.

Les phénomènes géographiques impliquent souvent une combinaison de ces trois principes fondamentaux, notamment sous la forme d'une concurrence-complémentarité, ou d'une attraction-répulsion. Ainsi E. L. Ullman (1954) identifie trois raisons pour lesquelles les personnes, biens ou informations se déplacent entre un point d'origine O et un point de destination D, soit trois moteurs des interactions spatiales : la complémentarité entre O et D (le lieu D offre ou permet une chose souhaitée (bien, information, service, relation sociale...) qui est non disponible ou non possible dans le lieu O), la transférabilité (le coût du déplacement entre O et D est surmontable ou, plus fondamentalement, le déplacement est possible), et les occasions interposées (il existe d'autres possibilités d'obtenir ou de réaliser la chose souhaitée en d'autres lieux situés sur le trajet menant du point O au point D). T. Hägerstrand (1952 ; 1967 [1953]) fait aussi intervenir ces trois principes pour décrire la diffusion d'une innovation (il peut aussi s'agir de la diffusion d'une maladie, d'un sport, la propagation d'un incendie...) : un processus de diffusion implique le déplacement des hôtes et/ou des adoptants (intervention du principe de minimisation de l'énergie utilisée pour les déplacements), le fait que hôte et adoptant doivent se retrouver au même endroit ou bien partager un intérêt commun pour un médias de diffusion donné (journaux, télévision, Internet...) (intervention du principe de complémentarité ou de congruence), et le fait que l'innovation doit pouvoir s'imposer en tant que telle (intervention du principe de compétition, de concurrence). Un troisième exemple de combinaison des trois principes se trouve dans le modèle de H. Hotelling (1929), qui montre que deux marchands de glace sur une plage ont intérêt à la fois à se localiser l'un à côté de l'autre, au milieu de la plage, pour maximiser leur nombre de clients potentiels et à s'éloigner le plus possible l'un de l'autre pour éviter la concurrence mutuelle, tout en s'éloignant le moins possible de la clientèle potentielle.

Partant de ces trois principes fondamentaux, on peut énoncer cinq lois qui déterminent la concentration et la dispersion des implantations humaines, concentrations et dispersions mesurées en tant qu'états ou modélisées en tant que processus.

1.2 Cinq lois

Très tôt des lois ont été énoncées en géographie, et plus généralement dans les sciences sociales : lois sur la migration d'E. Ravenstein (1885, 1889) (voir ci-après), loi économique dite "des débouchés" de J.-B. Say (1803) (c'est la production qui ouvre des débouchés aux produits ; autrement dit, l'offre crée sa propre demande), loi rang-taille des villes mise en évidence en 1913

par F. Auerbach puis popularisée par G. Zipf (1949), loi de l'effet proportionnel de R. Gibrat (1931) (les firmes croissent selon une logique multiplicative, indépendante de leur taille initiale).

Énoncé des lois sur la migration de G. Ravenstein, d'après (Tobler 1995) :

- (1) "... even in the case of 'counties of dispersion', which have a population to spare for other counties, there takes place an inflow of migrants across that border which lies furthest away from the great centers of absorption". (1885:191)
- (2) "The more distance from the fountainhead which feeds them, the less swiftly do these currents flow". (1885:191)
- (3) [We have] "proved that the great body of our migrants only proceed a short distance". (1885:198)
- (4) "In forming an estimate of displacements we must take into account the number of natives of each county which furnishes the migrants, as also the population of the ... districts which absorb them". (1885:198)
- (5) "Migrants enumerated in a ... center of absorption will ... grow less with the distance proportionally". (1885:199)
- (6) "The process of dispersion is the inverse of that of absorption, and exhibits similar features". (1885:199)
- (7) "Each main current of migration produces a compensating counter current". (1885:199)
- (8) "Counties having an extended boundary in proportion to their area, naturally offer greater facilities for an inflow ... than others with a restricted boundary". (1885: 175)
- (9) [Migration streams] "sweep along with them many of the natives of the counties through which they pass [and] deposit, in their progress, many of the migrants, which have joined them at their origin". (1885:191)
- (10) "Migratory currents flow along certain well defined geographical channels". (1889:284)

Certaines lois ont une portée plus générale que d'autres. Certaines portent sur des processus (par exemple, les lois de Ravenstein) tandis que d'autres portent sur des états (par exemple, la loi rang-taille des villes).

Malgré l'énoncé précoce de lois en sciences sociales, postuler l'existence de lois en géographie ne fait pas consensus parmi les géographes.

« One, like many social scientists, believes that there are not, and cannot be, any such thing as laws where human behavior is involved. One argument is that once an empirical regularity—perhaps qualifying for the status of a law—is discovered, it will be modified by the people involved and thus rendered inoperable. (...) In Flyvbjerg (2001, pages 44–45) we find an assertion that the social sciences are incapable of producing laws. He advocates an action-oriented, invariably interventionist, social science and cites Giddens (1982) who later writes that it "is preferable not to use the term [law] in social science" (Giddens 1984, page 347) » (Tobler 2004).

A ce sujet, F. Varenne (2016) remarque que pour F. Schaefer (1953, pages 247-248), les lois de processus ne sont pas des lois géographiques à proprement parler car elles doivent mobiliser des savoirs anthropologiques, économiques et d'autres dimensions encore de la vie humaine qui relèvent d'autres sciences que de la seule géographie. Mais il mentionne aussi l'espoir de R. Chorley qui est de mettre au jour les processus présidant aux phénomènes géographiques en général. « Pour Chorley, on peut et on doit imaginer que des lois de processus typiquement géographiques

président à l'instauration de lois empiriques de types morphologiques, aussi bien en géographie physique qu'en géographie humaine que dans le mixte des deux » (Varenne 2016).

Sans besoin de trancher pour ou contre l'existence de lois en géographie, ni définir exactement ce qu'est une loi (« *no single definition of a law exists which is acceptable to all* » (Golledge 1968)), poser et s'appuyer sur des lois est utile dans une démarche de recherche qui vise à modéliser le monde réel pour mieux le comprendre.

Les lois énoncées en géographie proviennent d'analyses de données empiriques (observations, mesures du monde réel).

« En géographie, les données sont souvent issues de relevés de terrain (comptages : telle population en tel lieu à tel moment, prises de vue, relevés de températures...) et d'enquêtes auprès des populations. (...) Dans tous les cas, données et connaissances ne sont pas indépendantes dans le sens où le recueil, le captage du signal émis par le réel, et sa restitution sous la forme de données utilisables dans un modèle, impliquent, d'une part, la mobilisation de connaissances théorisées et, d'autre part, varient selon les connaissances mobilisées. Ceci a été exprimé par P. Ricœur (1964) : « Jamais observer ne signifie enregistrer un fait brut ». C'est le recours à un système de représentation, constitué d'un ensemble structuré de descripteurs ou variables définissant une grille d'analyse, qui permet de transformer des informations brutes en données mobilisables dans une construction scientifique. On ne peut, en effet, effectuer de relevés ou de mesures si l'on n'a pas une théorie en tête qui indique où il faut observer et comment observer pour obtenir une réponse. Les « faits » sont donc toujours construits et « chargés de théorie » (Gardin 1979) et l'établissement, dans un modèle, de descriptions organisées du domaine empirique et de faits stylisés dépend de l'arrière-plan conceptuel et théorique mobilisé (Phan et al. 2014) » (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio 2017).

Ci-après, nous avons choisi de retenir cinq lois pour décrire et expliquer les concentrations et dispersions des implantations humaines considérées à la fois en tant qu'états et en tant que processus.

Loi 1. Friction de la distance : des éléments proches ont davantage de chance d'être en relation (concentrations et dispersions considérées en tant que processus) ou d'être similaires (concentrations et dispersions considérées en tant qu'états) que des éléments éloignés car la friction de la distance atténue l'influence mutuelle des phénomènes au fur et à mesure de leur éloignement. Il s'agit de la première loi de la géographie selon W. Tobler (1970) : « *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things* ». « *Distance may be in hours, dollars, or kilometers; populations may be in income, numbers of people, numbers of telephones and so on; and the interaction may be in numbers of letters exchanged, number of marriages, similarity of artifacts or cultural traits and so on* » (Tobler & Wineburg 1971).

Loi 2. Rôle de l'appartenance à un même milieu : des éléments d'un même milieu ont davantage de chances d'être en relation (ou de se ressembler) que des éléments de milieux différents. Un même milieu peut être autant une même maille administrative (commune, région...), une même nation, les mêmes conditions climatiques, une même langue, un même groupe social... Cette deuxième loi explique en partie l'existence de discontinuités spatiales et d'effets de frontière. Elle recouvre la

relation "écologique" énoncée par F. Durand-Dastès (2001a) (Figure 1) et l'interaction territoriale (effet d'appartenir à une même maille ou entité spatiale) décrite par C. Grasland (2009)³.

Loi 3. Influence de la taille des entités considérées : des entités de grande taille, ayant une large emprise spatiale ou contenant une quantité importante d'individus, d'activités, d'information..., ont davantage d'influence sur les éléments de leur environnement que des entités de petite taille.

Loi 4. Dépendance d'échelles : pour un type donné d'implantations humaines, l'existence d'un processus de concentration considérant un certain voisinage implique un processus de dispersion considérant un voisinage plus large (ou plus restreint). La dépendance d'échelles se rapporte à la superposition, l'imbrication de multiples voisinages plus ou moins étendus, dont chacun définit l'enveloppe d'une catégorie d'interactions potentielles. Tout comme dans le cas de la loi de friction de la distance, le critère de définition d'un voisinage peut être spatial (« *the notion of neighborhood may refer either to a common affiliation with the same territorial grid (a person living in the same neighborhood or commune) or to a criterion of geometrical proximity or temporary accessibility (a person living less than 5 km or 10 minutes away* » (Grasland 2009)) ou autre (voisinage social, culturel...). En conséquence de la dépendance d'échelles, les états de concentration observés à une échelle (un certain niveau d'agrégation ou une certaine résolution spatiale) impliquent des états de dispersion à une autre échelle, et vice-versa. Ceci répond au *Modifiable Areal Unit Problem* décrit par S. Openshaw (1983) : les états de concentration ou de dispersion observés dépendent de la taille des unités spatiales élémentaires considérées (*scaling problem*), de la forme et du positionnement des unités spatiales élémentaires (*zoning problem*) et de la délimitation de la zone d'étude (« *results depend explicitly on the bounds of the study* » (Goodchild 2016)). Une corrélation entre deux phénomènes peut ainsi s'avérer négative lorsqu'elle est calculée sur certaines entités spatiales, et positive lorsqu'elle l'est sur d'autres (L. Sanders (2007) citant (Openshaw 1981) et (Ravenel 2003)). En particulier, le niveau de détail de la représentation de l'espace (niveau d'agrégation ou résolution spatiale) influence la mesure des concentrations et des dispersions. W. Tobler (2004) précise à ce sujet : « *Arbia's second law of geography reads "Everything is related to everything else, but things observed at a coarse spatial resolution are more related than things observed at a finer resolution."* This suggests that aggregation has a smoothing effect, as is well known (see Tobler 1969, 1990) ».

Cette quatrième loi est liée aux trois premières : concernant les processus de concentration et de dispersion, elle fait intervenir des voisinages dont les limites dépendent des deux premières lois ; concernant les états de concentration et de dispersion, elle fait intervenir la troisième loi.

Loi 5. Dépendance dans le temps : chaque phénomène influence sa propre variation dans le temps (cf. Figure 1). Cette loi introduit l'explication « historique » des concentrations et dispersions considérées en tant qu'états (Tobler 1979) ainsi que la dépendance à la trajectoire (*path dependency*) dans la simulation des processus de concentration et de dispersion.

Ces cinq lois sont très générales et valables pour tous les phénomènes (états et processus) de concentration et de dispersion des implantations humaines. Cependant, la première loi ne dit rien quant à l'intensité de la friction de la distance. Celle-ci peut varier dans le temps, dans l'espace et, pour un même lieu au même moment, en fonction des caractéristiques des entités considérées. Son rôle, son influence sur les concentrations et dispersions des implantations humaines dépend des

³ « *We propose to use the term "spatial interaction" for general effects of distance measured in a mathematical continuous form and to specify "territorial interaction" when we want to measure the discontinuous effect of a partition of space* » (Grasland 2009).

besoins d'interactions (relations, échanges, prélèvements...) et des moyens à disposition des entités pour les réaliser (par exemple, la vitesse de déplacement des entités ou bien leur accès ou non à des moyens d'échange ou de communication à distance). La deuxième loi ne dit rien quant à l'intensité ni aux modalités d'influence de chaque milieu sur les entités considérées. La troisième loi ne définit pas l'intensité ni les modalités de l'influence de la taille des entités sur leur environnement. Il en va de même pour les troisième et quatrième lois.

En quantifiant et formalisant les intensités et les modalités d'application de ces cinq lois générales, d'autres lois peuvent être énoncées, qui seront moins générales mais plus précises, et propres à un ensemble de lieux pour une période donnée. De telles lois empiriques⁴ peuvent être de différents types. R. Golledge et D. Amadeo (1968) en distinguent cinq.

Cinq types de lois cités dans (Golledge & Amadeo 1968).

A cross-section law states the functional connections between the values which several variables have at the same time. The schema of a cross-section law is: For every X , X is A if and only if X is B . Wherever there occurs an urban place of size A , then there will be $f(A)$ urban functions associated with it.

An equilibrium law states that some change will occur if the connection the equilibrium formula states does not obtain. These laws are also static and, in a sense, they are imperfect -i.e., they say what will occur if certain conditions are fulfilled, but do not say what will occur if the conditions are not fulfilled. A paraphrase of Fetter's law of Market Area Boundaries would be: If $(p_1 + TC_1)$ is the delivered-to-customer cost of a good from center A and $(p_2 + TC_2)$ is the delivered-to-customer cost from center B , then a market area boundary will exist between A and B at that point where $(p_1 + TC_1) = (p_2 + TC_2)$.

A dynamic law states that, if a system exemplifies at a certain time a certain character, then it exemplifies at some later time a certain other character (and conversely). That is, if at time t_0 , a system has the character a , then it will have at some later time t_4 the character b . Conversely if a system at time t_4 has the character b then it must have had a at a specified earlier time, namely t_0 .

An historical law predicts the future not from the present alone but from the present in conjunction with some information about the past

A developmental law takes the form: If $(B$ now) then $(A$ earlier and successively C and then D later).

D'après M. Goodchild (2016), une loi empirique doit être suffisamment générale pour qu'elle serve de norme et que les écarts à la loi soient intéressants à étudier ; elle doit être toujours vraie pour des agrégats, mais pas nécessairement pour des individus. Quand des écarts à la loi sont mis en évidence, il est intéressant de chercher pourquoi : imprécision ou incomplétude des données, niveau d'agrégation des entités prises en compte trop fin ou trop grossier, zone d'étude trop large ou trop réduite, besoin de préciser la loi, d'énoncer une loi supplémentaire... Répondre à ces questions apporte de nouvelles connaissances géographiques.

4 F. Varenne (2016) définit une loi empirique comme l'énoncé d'une relation fonctionnelle constante entre les variables d'un même système.

Le grand nombre de déclinaisons quantifiées et formalisées possibles, en fonction des lieux de l'espace terrestre, des cinq lois générales exposées précédemment a amené M. Goodchild (2016) à suggérer que la seconde loi de la géographie pourrait être la loi d'hétérogénéité. De ceci découle une certaine difficulté à laquelle est confrontée la géographie (au même titre d'autres sciences sociales), à savoir l'existence de phénomènes de sous-détermination⁵ (Varenne 2016). Celle-ci traduit le fait qu'il est possible de modéliser théoriquement différents processus permettant d'expliquer la relation entre deux lois empiriques, ce qui est souvent le cas en géographie. Néanmoins, F. Varenne (2016) souligne aussi que la reconnaissance et le traitement explicite de sous-déterminations en géographie, via la modélisation et la simulation, est scientifiquement fécond.

2. Les systèmes de peuplement : dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines à différentes échelles

Dans cette section, nous mobilisons les principes fondamentaux et les lois précédemment énoncés pour établir une grille générique d'observation des dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines à différentes échelles, dont la conception a été initiée dans le cadre du projet TransMonDyn "*Modéliser les grandes transitions de l'évolution du peuplement dans l'Ancien et le Nouveau Monde*" (2011-2015), dirigé par L. Sanders, voir (Tannier, Zadora-Rio, Leturcq, Rodier, Lorans 2014).

« L'objectif est de développer un cadre conceptuel générique pour décrire ces grandes transformations du système de peuplement. Ce cadre doit être suffisamment spécifique pour cerner la dimension spatiale du changement et suffisamment générique pour pouvoir être appliqué à des périodes, des espaces et des échelles variés » (Sanders 2014).

La grille de lecture que nous proposons ici en trois tableaux permet d'observer un système de peuplement selon trois niveaux d'organisation emboîtés hiérarchiquement⁶ : un niveau microscopique dans lequel on considère des entités élémentaires de type foyers (ou, en fonction du contexte, ménage, famille, seigneurie, tribu...), un niveau mésoscopique dans lequel on considère indépendamment chaque unité de peuplement (village, ville), et un niveau macroscopique dans lequel on considère l'ensemble des unités de peuplement formant un système de peuplement. Pour chacun de ces trois niveaux, différentes caractéristiques ont été retenues comme étant fondamentales à observer compte tenu de leur influence directe sur la concentration ou la dispersion des implantations humaines. L'évolution de chacune de ces caractéristiques au cours du temps entraîne des dynamiques de concentration ou de dispersion variables selon le niveau d'organisation considéré.

Pour chaque foyer (Tableau 1), les activités pratiquées peuvent être agricoles, guerrières, religieuses, artisanales, industrielles, politiques, commerciales, culturelles... Tout ou partie de ces activités peuvent être réalisées sur des espaces partagés par différents foyers (espaces

5 « La thèse dite de la "sous-détermination" est celle selon laquelle les données expérimentales ne sont jamais susceptibles de servir à la détermination univoque d'une théorie rendant compte de ces données, qu'elles ne peuvent donc jamais servir univoquement ni à la fonder, ni à la vérifier, ni à la corroborer (Quine 2003, pp. 76-77) » (Varenne 2016).

6 Si on se réfère aux 21 fonctions épistémiques des modèles identifiées par F. Varenne (2017), cette grille de lecture est un modèle répondant à la fonction épistémique n°6 "Faciliter une sélection de types d'entités ou de propriétés" au sein de la fonction générale II "Faciliter la formulation intelligible".

communautaires ou publics), tels que parcs urbains, places publiques, aires de stationnement, moulins et fours banaux (au Moyen-Age en Europe). Le nombre et les types d'activités pouvant être réalisées hors foyer varie pour chaque foyer, en fonction des caractéristiques de celui-ci (son statut social notamment) et de la distance qui le sépare de ses activités. L'environnement de chaque foyer est à la fois naturel (climat, nature du sol et du sous-sol, topographie, exposition au soleil...), social, économique, technologique, politique, religieux, culturel. Il peut être local, régional ou plus vaste (réseau de villes, pays...).

Tableau 1. Entité élémentaire : foyer

Caractéristiques d'un foyer	Relation avec les autres caractéristiques du foyer	Implication de cette caractéristique sur l'unité de peuplement (agrégation bottom-up)	Influence top-down des niveaux mésoscopique et macroscopique sur ladite caractéristique
Nombre d'individus Age des individus	<i>Un grand nombre d'individus par foyer favorise la diversité des activités réalisées au sein de chaque foyer, surtout si les âges des individus sont diversifiés.</i>	<i>Le nombre d'individus dans un foyer et leurs âges déterminent en partie le nombre de foyers dans l'unité de peuplement (par création de nouveaux foyers ou disparition de foyers).</i>	Unité de peuplement <i>Arrivée d'individus d'autres foyers de l'unité de peuplement ou départ d'individus vers d'autres foyers de l'unité de peuplement.</i> Système de peuplement <i>Arrivée d'individus d'autres unités de peuplement ou départ d'individus vers d'autres unités de peuplement (migrations).</i>
Statut social	<i>Le statut social détermine en partie le nombre et les types d'activités pouvant être réalisées par les individus du foyer, ainsi que le nombre et les âges des individus.</i>	<i>Détermine le nombre et la diversité des statuts sociaux au sein de l'unité de peuplement.</i>	Unité de peuplement <i>Possibilité de changer de statut social au sein de l'unité de peuplement.</i>
Nombre et types d'activités pratiquées	<i>Dépend du statut social du foyer ainsi que du nombre et des âges des individus le composant.</i> <i>Détermine en partie la fréquence des échanges ou contacts avec d'autres individus hors foyer.</i>	<i>Détermine le nombre et la diversité des activités au sein de l'unité de peuplement.</i>	Unité de peuplement <i>Nombre et types d'activités pouvant être réalisées dans l'unité de peuplement.</i> Système de peuplement <i>Nombre et types d'activités pouvant être réalisées dans d'autres unités de peuplement.</i>
Nombre et types d'activités réalisées sur des espaces partagés par plusieurs foyers	<i>Peut amener à une réduction ou une augmentation de l'emprise spatiale des lieux occupés en propre par le foyer.</i>	<i>La réalisation d'activités sur des espaces partagés par différents foyers (espaces communautaires ou publics) peut favoriser la concentration des implantations des foyers à proximité de ces espaces.</i>	Unité de peuplement <i>Existence d'espaces partagés.</i>
Distance entre les différents lieux d'activités des individus	<i>Peut limiter le nombre d'activités réalisées ainsi que leur diversité.</i>	<i>Détermine en partie l'emprise spatiale de l'unité de peuplement.</i>	Unité de peuplement <i>Son étendue spatiale peut favoriser ou non l'éloignement des différents lieux d'activités.</i>

Caractéristiques d'un foyer	Relation avec les autres caractéristiques du foyer	Implication de cette caractéristique sur l'unité de peuplement (agrégation <i>bottom-up</i>)	Influence <i>top-down</i> des niveaux mésoscopique et macroscopique sur ladite caractéristique
Fréquence des contacts ou échanges avec des individus hors foyer	<i>Dépend du nombre et du type d'activités réalisées par les membres du foyer.</i>	<i>La fréquence des contacts ou échanges avec d'autres individus appartenant à d'autres foyers de la même unité de peuplement peut amener les foyers à se rapprocher les uns des autres.</i>	Unité de peuplement <i>Nombre et types d'activités pouvant être réalisées hors foyer dans l'unité de peuplement.</i> Système de peuplement <i>Nombre et types d'activités pouvant être réalisées dans d'autres unités de peuplement.</i>
Emprise spatiale des lieux occupés en propre et de manière pérenne par le foyer	<i>Détermine en partie la distance entre les lieux d'activités des individus du foyer.</i>	<i>Détermine en partie la distance entre les lieux (d'habitation ou d'activités) de chaque foyer, et donc l'emprise spatiale de l'unité de peuplement.</i>	Unité de peuplement <i>Son étendue spatiale peut favoriser l'éloignement des foyers les uns des autres.</i>
Environnement du foyer	<i>Influe sur les activités réalisables et réalisées par le foyer, ainsi que sur le nombre et les âges des individus le composant (comportement socio-démographique).</i>		

Le nombre de foyers par unité de peuplement (Tableau 2) peut augmenter ou diminuer indépendamment du nombre d'individus. Tel est par exemple le cas actuellement en France où le nombre de ménages augmente bien plus que le nombre d'individus, tandis leur taille diminue, en raison du vieillissement de la population et de l'augmentation du nombre de divorces et de séparations de couples. Au contraire, une réduction du nombre de ménages peut être observée quand, dans chaque famille, plusieurs générations ont de plus en plus tendance à vivre ensemble sous le même toit.

Le nombre et la diversité des activités réalisées au sein d'une unité de peuplement peut résulter d'une diversité d'activités au sein de chaque foyer et/ou entre les différents foyers de l'unité de peuplement.

La situation de l'unité de peuplement au sein d'un réseau d'échanges (ou de contacts) avec d'autres unités de peuplement peut changer au cours du temps notamment en raison d'une évolution des fonctionnalités du réseau de transport. Celles-ci influent sur et peuvent être influencées par le fait qu'un nombre conséquent d'individus de l'unité de peuplement (et non quelques individus isolés, tels que des marchands itinérants) rencontrent plus ou moins régulièrement d'autres groupes humains résidant dans d'autres unités de peuplement (par exemple, à l'occasion de célébrations religieuses, d'assemblées, de marchés).

L'environnement physique de l'unité de peuplement (climat, topographie, sol, sous-sol...) exerce une influence plus particulière sur certaines activités : agricoles, touristiques, de loisir, d'exploitation de ressources...

L'emprise spatiale de chaque unité de peuplement, c'est-à-dire la taille du territoire de chacune d'elles (surface occupée), comprend les espaces dévolus à l'habitat, le territoire agraire (cultures et élevage), les territoires d'approvisionnement extensif (chasse, pêche, cueillette, bois) et les espaces dévolus aux autres activités (à l'époque contemporaine : parkings, zones commerciales et

industrielles, réseaux routiers et de transport en commun...). Cette emprise spatiale peut être vaste sans pour autant que le nombre de foyers soit important quand les activités réalisées présentent une dépendance saisonnière à l'environnement (par exemple, allers et retours saisonniers entre deux terroirs) ou à un élément mobile de l'environnement (par exemple, transhumance).

Tableau 2. Entité mésoscopique : unité de peuplement

Caractéristique d'une unité de peuplement	Relation avec les autres caractéristiques de l'unité de peuplement	Implication de cette caractéristique sur le système de peuplement (agrégation bottom-up)	Influence top-down du niveau macroscopique (système de peuplement) sur ladite caractéristique
Nombre de foyers Diversité des types de foyers	<i>Influe sur le nombre et la diversité des activités réalisées au sein de l'unité de peuplement.</i> <i>Détermine en partie l'emprise spatiale de l'unité de peuplement.</i> <i>Détermine en partie la concentration ou dispersion des foyers dans l'unité de peuplement.</i>	<i>Détermine en partie le nombre de foyers et leur diversité au sein du système de peuplement.</i>	<i>Migrations en provenance de ou à destination d'autres unités de peuplement.</i>
Nombre et diversité des activités réalisées	<i>Détermine en partie l'emprise spatiale de l'unité de peuplement.</i> <i>Détermine en partie la concentration ou dispersion des activités dans l'unité de peuplement.</i>	<i>Détermine en partie la fréquence des contacts ou échanges recherchés avec des individus appartenant à d'autres unités de peuplement.</i> <i>Détermine en partie la concurrence et la complémentarité des activités au sein du système de peuplement.</i>	<i>Nombre et types d'activités pouvant être réalisées dans d'autres unités de peuplement.</i> <i>Transfert ou essaimage d'activités vers ou en provenance d'autres unités de peuplement.</i>
Situation au sein d'un réseau de contacts ou d'échanges avec d'autres unités de peuplement	<i>Influe sur le nombre et types de foyers ainsi que les types d'activités réalisées dans l'unité de peuplement.</i>	<i>Détermine en partie de la nature et l'intensité des échanges et des migrations (foyers et activités) au sein du système de peuplement.</i>	<i>Intensité et nature des réseaux d'échanges et des flux migratoires entre les unités de peuplement.</i>
Environnement physique (ou naturel) de l'unité de peuplement	<i>Influe sur les activités réalisables au sein de l'unité de peuplement.</i> <i>Peut influencer la concentration ou dispersion des foyers et des activités au sein de l'unité de peuplement.</i> <i>Peut déterminer en partie l'emprise spatiale de l'unité de peuplement.</i>		
Emprise spatiale de l'unité de peuplement	<i>Dépend notamment du nombre de foyers, ainsi que du nombre et des types d'activités réalisées.</i>		

De la plus ou moins grande diversité de tailles des unités de peuplement (Tableau 3) résulte un système de peuplement plus ou moins hiérarchisé. Les distances entre les unités de peuplement peuvent être mesurées au moyen de plusieurs types de métriques, notamment une métrique "à vol d'oiseau" et une métrique fonctionnelle composite (incluant le temps de trajet, le coût financier, la pénibilité...).

Tableau 3. Entité macroscopique : le système de peuplement dans son ensemble

Caractéristique du système de peuplement	Relation avec les autres caractéristiques du système de peuplement
Emprise spatiale du système de peuplement	<i>Dépend du nombre d'unités de peuplement et de la distance métrique qui les sépare.</i>
Nombre d'unités de peuplement	<i>Dépend des limites fixées au système de peuplement.</i>
Diversité de taille des unités de peuplement	<i>Dépend de la nature et de l'intensité des échanges et des migrations entre les unités de peuplement.</i>
Distances entre les unités de peuplement	<i>Dépend en partie du nombre d'unités de peuplement.</i>
Diversité des activités entre chaque unité de peuplement	<i>Dépend de la facilité des échanges et des migrations (foyers et activités) entre les unités de peuplement.</i>
Nature et intensité des échanges et des migrations (de foyers et d'activités) entre les unités de peuplement	<i>Dépend en partie de la distance entre les unités de peuplement. Dépend en partie de la concurrence et complémentarité des activités réalisées au sein du système de peuplement.</i>

Cette grille d'observation d'un système de peuplement en trois niveaux d'organisation fait appel aux cinq lois énoncées en section 1.2 : friction de la distance ; rôle de l'appartenance à un même milieu (à travers les caractéristiques impliquant l'influence de l'environnement et les caractéristiques impliquant des échanges ou des contacts entre entités) ; influence de la taille des entités considérées (à travers les caractéristiques impliquant des nombres et des intensités), dépendance d'échelles (à travers les influences *top-down* et *bottom-up* entre les niveaux d'organisation) ; dépendance dans le temps. Concernant cette dernière loi, L. Sanders (2014) précise comment elle intervient dans la dynamique des systèmes de peuplement :

« En tant que systèmes complexes, l'évolution des systèmes de peuplement implique (...) des interactions entre plusieurs niveaux d'organisation (...). Les interactions entre les niveaux opèrent (...) dans les deux sens. Les interactions entre les entités du niveau élémentaire conduisent à l'émergence de structures observables au niveau supérieur (bottom up) (...). Une fois ces structures en place, elles constituent le « contexte » dans lequel évoluent les entités élémentaires et influent sur leurs interactions (top down). Les structures qui émergent ne sont pas prédictibles et il suffit d'un léger aléa pour qu'elles se présentent sous une forme différente. En revanche, une fois qu'elles existent, elles influent sur l'évolution à venir, amenant le système à suivre une certaine trajectoire (path-dependency) ».

Une hypothèse sous-jacente à la conception de cette grille d'observation est que la complexification de l'organisation sociale (dont résulte notamment une diversification de statuts sociaux des foyers) favorise une diversification des activités des entités (foyers, unités de peuplement). Au cours du

temps, la diversification des activités entraîne une spécialisation fonctionnelle des lieux : en chaque lieu sont réalisées des activités (production de biens matériels, spirituels, culturels, d'informations, de connaissances...) différentes d'en d'autres lieux. Si les produits, compétences ou personnes sont mobiles, ceci entraîne une augmentation du nombre et de la variété des interactions entre les entités concernées. Ces interactions se concentrent souvent en des lieux (interactions spatiales et territoriales), d'où l'émergence d'une polarisation ou multi-polarisation fonctionnelle de l'espace⁷. Celle-ci peut s'observer à l'échelle de chaque unité de peuplement ou de l'ensemble du système de peuplement.

Les moteurs de la spécialisation fonctionnelle au sein d'un système de peuplement sont soit endogènes (innovations technologiques, sociales, politiques, religieuses qui augmentent la complexité sociale et, dans certains cas, entraînent une croissance ou une décroissance démographique), soit exogènes (modifications de l'environnement : optimum climatique, sécheresse, épidémie ; ou arrivée d'un autre groupe humain sur le territoire : colonisation, conquête). Ces deux moteurs exogènes peuvent entraîner des innovations technologiques, sociales, religieuses ou politiques.

« C'est sans doute dans le domaine de la production économique liée à la maîtrise technique que la fonction d'adaptateur des villes apparaît le plus clairement. Si on les compare aux autres formes de l'habitat humain que sont les villages, exploitant dans un rapport écologique des ressources locales, soumis aux limitations de ce milieu et à des aléas climatiques locaux, les villes assurent une multiplication des richesses (Reymond, 1981), par des processus internes, à l'échelle de chaque ville, et surtout par des processus externes, impliquant des relations avec d'autres lieux, parfois selon des portées très larges. A l'échelle de la ville, sont bien identifiés des processus d'organisation sociale du travail qui améliorent la productivité, et qui rendent possible une accélération de l'innovation grâce à une fréquence accrue des interactions. Les villes ont émergé, « spontanément », dans toutes les régions du monde où était apparue l'agriculture, environ 3000 ans après l'émergence de celle-ci (Bairoch, 1985 ; Diamond, 1997). L'organisation urbaine se caractérise par la multiplication des rôles sociaux, induisant une division sociale du travail, qui à terme, lorsqu'elle est jointe à des formes non exclusivement prédatrices de l'accumulation, permet d'augmenter la productivité. Les interprétations économistes de « la » ville mettent ainsi l'accent sur des économies d'échelle ou des économies d'agglomération ou d'urbanisation (Fujita et Thisse, 2002 ; Eeckhout, 2004 ; Glaeser, 2008), qui sont en fait des interprétations « instantanées » de ces processus qui se déroulent dans le temps et impliquent très souvent des évolutions de durées assez longues dans les interactions en réseau (Rozenblat, 2010).

(...) La mise en réseau des villes permet d'échapper aux limitations des ressources locales et dans le même temps oblige par émulation à continuer l'innovation, dans la rivalité et la concurrence avec les autres villes. Par les échanges d'information qui s'opèrent entre les villes connectées en réseau, l'innovation circule et devient motrice du développement urbain auquel elle s'identifie » (Pumain 2012).

L'intensité de la polarisation fonctionnelle résulte, en des degrés variables, de phénomènes amenant à la concentration spatiale et d'autres, à la dispersion spatiale. Au sein d'une même unité de peuplement, les phénomènes qui amènent à la concentration des foyers ou des activités peuvent

⁷ Une aire de polarisation fonctionnelle, ou aire d'influence, est différente d'une aire d'exploitation des ressources. En effet, l'exploitation des ressources implique une dépendance (plus ou moins forte) à l'environnement physique tandis qu'une polarisation fonctionnelle implique une dépendance à d'autres activités humaines (ou d'autres groupes humains, d'autres unités de peuplement).

être :

- la complémentarité des activités combinée au frein de la distance maximum pouvant être parcourue sur une journée, qui crée des besoins d'échanges entre foyers ou entre unités de peuplement, favorisant ainsi le rapprochement d'implantations humaines de même type ou de types différents (par exemple, le rapprochement d'une offre et d'une demande) ;
- la croissance démographique ;
- une recherche de protection vis-à-vis des envahisseurs ;
- une volonté de contrôle politique, administratif ou religieux.

Les phénomènes qui amènent à la dispersion spatiale des foyers ou des activités d'une même unité de peuplement peuvent être :

- une superficie importante des unités d'habitat (le logement et ses dépendances) ou des territoires d'exploitation des ressources par chaque foyer (territoires de chasse, zones d'exploitation agricoles, etc.) ;
- la concurrence entre activités, par exemple quand une même activité peut être réalisée soit au sein du foyer (ou de l'unité de peuplement), soit hors foyer (ou hors unité de peuplement) à des coûts (monétaires, psychologiques, énergétiques...) et avec des qualités de résultats différents.

De la même manière, à l'échelle d'un système de peuplement, la spécialisation fonctionnelle des unités de peuplement peut être à l'origine de leur concentration, quand chaque unité de peuplement doit être suffisamment proche (en distance-temps ou distance-coût) des unités de peuplement effectuant les activités qu'elle-même n'effectue pas, ou de leur dispersion, sous l'effet d'une concurrence entre unités de peuplement (aires de chalandise, territoires d'exploitation des ressources) ou bien d'une volonté politique.

Un processus de concentration ou de dispersion peut, au bout d'un certain laps de temps, créer un processus inverse. Par exemple, la concentration d'activités dans une ville peut être suivie d'une déconcentration d'activités hors de la ville quand apparaissent des déséconomies d'échelle. Autre exemple, la tendance au rapprochement d'une offre et d'une demande peut aboutir à la dispersion des implantations de l'une ou de l'autre quand apparaît une nouvelle catégorie d'offre ou de demande qui s'ajoute à la première sans la supplanter.

Spécialisation et polarisation fonctionnelles sont très importantes à considérer pour l'étude des transformations d'un système de peuplement car elles suscitent une organisation spatiale plus ou moins hiérarchique. Notamment, plus les unités de peuplement sont nombreuses et diversifiées en termes d'accessibilité et de centralité fonctionnelle, plus leurs tailles peuvent être également diversifiées.

3. Intégration du contenant spatial et du contenu social des lieux

Dans l'analyse de la concentration et de la dispersion des implantations humaines, le social et le spatial sont fondamentalement liés.

« Le lieu [est] habité, c'est-à-dire fréquenté et reconnu ; le lieu [est] dit, donc nommé, ce point du globe auquel les hommes ont donné un nom, le faisant ainsi exister ; auquel ils attribuent des qualités, qui vont de ce qui est objectivable et mesurable à ce qui est poésie, mythe et religion ; qu'ainsi ils consacrent et parfois décident sacré ; pour lequel, même, ils se battent » (Brunet 1989).

Cependant, pour des raisons pratiques (conduite de recherches notamment), on favorise soit une entrée spatiale, soit une entrée sociale. Par exemple, la théorie de l'identité sociale de H. Tajfel et J. Turner (1986) postule un lien entre construction identitaire et appartenance groupale, tandis que la théorie de l'identité urbaine de H. Proshansky (1978) identifie une relation forte avec un lieu. Ces deux aspects sont en réalité imbriqués dans la mesure où les groupes sociaux s'inscrivent, fonctionnent dans des espaces, et les marquent. Les deux processus (identification spatiale et identification sociale) sont donc d'une part, comparables dans le sens où ils mobilisent tous les deux des stratégies pour instaurer et développer une identité positive, et d'autre part intensément imbriqués dans la mesure où l'appartenance groupale s'inscrit aussi spatialement au niveau du lieu de résidence et des espaces fréquentés. C'est également ce que défendent C. Twigger-Ross et D. Uzzel (1996) : « *We would, however, suggest that rather than there being a separate part of identity concerned with place, all aspects of identity will, to a greater or lesser extent, have place-related implications* ». Ainsi, dans le modèle de choix résidentiel des ménages de O. Devisch, H. Timmermans, T. Arentze et A. Borgers (2006), le processus de choix résidentiel d'un ménage se déroule dans un environnement à la fois « physique », qui est le marché du logement, et social, composé des autres ménages. Cette distinction entre environnement physique et environnement social se retrouve dans de nombreux travaux. D'après A. Bailly (1996), elle était déjà présente dans les premières analyses des représentations urbaines, les unes ayant trait à la structure du lieu (espace concret perçu par l'homme), les autres aux significations économiques et sociales. L'environnement social exerce une influence sur les comportements individuels. Toutes les disciplines des sciences sociales reconnaissent cette réalité, bien qu'elle soit évacuée de certains modèles de choix, notamment en économie⁸.

Le modèle de choix de G. Akerlof (1997) est à cet égard exemplaire. Il s'applique à des décisions ayant des conséquences sur les relations sociales : investissement dans les études, mariage, localisation résidentielle... L'idée fondamentale de ce modèle est que les déterminants essentiels de la décision d'un individu se rapportent à l'impact de ses choix sur les interactions qu'il peut avoir avec les membres de son réseau social, tandis que les déterminants habituels du choix économique (utilité du consommateur) sont seulement secondaires. (Cette idée a été reprise et développée ultérieurement par d'autres auteurs, par exemple E. Glaeser et J. Scheinkman (2001)). Sur la base de ce modèle, G. Akerlof montre que l'introduction d'interactions sociales dans une prise de décision économique aboutit à un comportement des individus davantage en accord avec les intuitions des sociologues que celles des économistes. La plupart des états d'équilibre atteints par son modèle consistent en des sous-optimums économiques qui correspondent à des optimums sociaux en termes de quantité de relations sociales avec d'autres individus socialement proches. Sur le plan spatial, le modèle de G. Akerlof pourrait expliquer le fait que des individus demeurent dans un quartier socialement dévalorisé, pour préserver leurs relations sociales, quand bien même ils auraient les revenus suffisants pour résider dans un quartier mieux coté. Une importante littérature dans la lignée de W. Clark (1986) fait référence à cette relation pour expliquer la ségrégation spatiale des minorités ethniques, à l'opposé de l'hypothèse de discrimination défendue par G. Galster (1988) (Bouzouina 2008).

8 Notamment, les modèles économiques classiques de choix résidentiels basés sur la théorie des choix discrets sont a-spatiaux (Pellegrini & Fotheringham 2002), c'est-à-dire qu'ils ne considèrent pas l'espace dans les variables de décision (Onaka & Clark 1983 ; Ben-Akiva & de Palma 1986). Au contraire, un modèle est dit spatialement explicite (Zellner 2008 ; Crooks & Heppenstall 2012) lorsque les ménages sont localisés dans l'espace et qu'ils ont conscience leur environnement, ce qui leur permet d'en tenir compte dans leurs choix à travers les notions de proximité et d'accessibilité (Hirtzel 2015).

Ainsi, la correspondance entre contenu social et contenant spatial des lieux a été établie par différents auteurs. A. Paez D. Scott et E. Volz (2008), en s'appuyant sur les réflexions de P. Marsden et N. Friedkin (1994), ont pointé du doigt la ressemblance des outils méthodologiques utilisés pour analyser les dépendances sociales (par exemple, les mesures d'autocorrélation dans les réseaux sociaux) et les dépendances spatiales (mesures d'autocorrélation spatiale et, plus généralement, géostatistiques et statistiques spatiales). Le principe à la base de tous ces outils est que la proximité dans l'espace (qu'il soit géographique ou social) augmente la probabilité que deux phénomènes soient reliés, au moins d'un point de vue statistique. La mise en évidence d'une corrélation entre le comportement d'individus partageant une proximité sociale ou spatiale amène à rechercher une explication à cette corrélation. D'après C. Manski (2000), on cherche à savoir si cette corrélation provient du fait que les individus partagent une même source d'information ou une même caractéristique individuelle (effet corrélé), ou bien si les individus possèdent une même caractéristique individuelle résultant d'une auto-sélection (effet contextuel, ou effet social exogène), ou encore si les individus échangent réellement les uns avec les autres (effet social endogène) (Tannier, Morer, Ansel 2012). C. Grasland (2009) a également établi une correspondance entre la distinction faite par le sociologue P. M. Blau (1977a, 1977b) entre "caractéristiques nominales" (*nominal parameters*) et "caractéristiques graduées" (*graduate parameters*) pour l'étude des positions sociales, d'une part, et la distinction que lui-même propose entre "caractéristiques territoriales" (*territorial parameters*) et "caractéristiques spatiales" (*spatial parameters*) pour l'étude des positions géographiques, d'autre part. Pour C. Grasland, les "caractéristiques territoriales" (effet de l'appartenance à un même milieu) recouvrent les "caractéristiques nominales" définies par P. M. Blau (« *Nominal parameters pertain to the qualitative attributes of individuals and define social categories such as ethnic group, religious affiliation, professional activity, etc.* », cité dans (Grasland 2009)). Parallèlement, les "caractéristiques spatiales" (effet de la distance) recouvrent les "caractéristiques graduées" de P. M. Blau (« *Graduate parameters refer to quantitative attributes, i.e. continuous distributions of differences of resources and statuses such as income, education, etc. that serve to define social strata. The degree of differentiation of graduate parameters reflects inequality, defined (...) as the coefficient of variation (or Gini index) of differences between levels* », cité dans (Grasland 2009)). Sur la base de cette correspondance, C. Grasland défend l'intégration simultanée des positions sociales et géographiques pour l'étude des formes et des relations sociales.

Appliquée à l'étude de la concentration et de la dispersion des implantations humaines, l'intégration du contenant spatial et du contenu social des lieux signifie que les différenciations socio-spatiales des lieux (différences en termes de position sociale et/ou spatiale) créent et sont créées par les mouvements dans l'espace physique et social (changements de position sociale et/ou spatiale) des entités étudiées.

4. A propos de la dépendance d'échelles

« *Quelle que soit la conception de la géographie que nous défendons, nous ne sommes pas obligés de penser qu'il y a des niveaux d'observation intangibles. Au contraire, nous pouvons faire l'hypothèse que la définition d'un ou de plusieurs niveaux ici et maintenant fait partie de ce qu'il faut sans cesse remettre sur le métier* » (Orain 2004).

« (...) *dans une démarche heuristique, il apparaît souvent plus intéressant d'appréhender l'espace géographique à travers des objets et des niveaux d'observation variés que de se limiter à un seul* » (Sanders 2007).

« *If one assumes that geographical processes operate at various scales, then a filtering by scales could separate processes. (...) Large-scale processes can thus be separated from small-scale processes as a preliminary step in geographical analyses* » (Tobler 1969).

« *L'échelle apparaît dès lors comme un filtre qui appauvrit la réalité mais qui préserve ce qui est pertinent par rapport à une intention donnée* » (Racine, Raffestin, Ruffy 1980).

« *The most promising solution seems to reside in the elaboration of embedded models that study interactions between locations at different aggregate levels, thus allowing for the inclusion of concentrations of opportunities for relations at different levels. If for instance the object is to study the potential for relations between two groups of students (white/black, men/women) in a given university, then we will need to take account not merely of the relative frequency of each group within the institution, but also of these relative frequencies respectively in each of the disciplines, subject areas and seminar groups within the university. Every level corresponds to specific opportunities for relations (on campus, in the secretary's office of a given department, in the lecture hall, within classrooms) that reduce opportunities for relations. Heterogeneity at one level (50% of students from every group in the entire university) may indeed conceal a perfect homogeneity across all or part of the lower levels (segregation according to subject matter, seminar groups, etc.)* » (Grasland 2009).

4.1 Observer et modéliser les phénomènes à plusieurs échelles

Nous avons vu, dans la section 2 de ce chapitre, que les dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines résultent de nombreux processus agissant à des échelles spatiales et temporelles différentes. Dans les modèles, ces différents processus peuvent être représentés au moyen d'une superposition, voire d'un enchevêtrement, de différents voisinages. Il s'agit soit de maillages (ou zonages), qui peuvent être emboîtés hiérarchiquement et permettent de représenter l'appartenance des entités sociales à un même milieu (processus d'interaction territoriale), soit de portées spatiales différentes pour chaque processus, qui permettent de représenter la friction de la distance (processus d'interaction spatiale). De la superposition et l'enchevêtrement de ces différents voisinages résultent des configurations spatiales des implantations humaines (au niveau élémentaire : foyers, activités ; au niveau mésoscopique : villages, villes) dont le degré de concentration ou de dispersion varie selon l'échelle d'analyse, d'où le *Modifiable Areal Unit Problem* (MAUP). En l'absence d'hétérogénéités ou d'inégalités, donc de différenciations spatiales, le MAUP n'existe pas.

On distingue donc le niveau d'analyse des résultats d'un modèle, qu'il soit statistique ou de simulation, c'est-à-dire le niveau agrégé auquel est observé le fonctionnement du système, de la granularité (spatiale ou sociale) de la modélisation, c'est-à-dire la finesse des entités sociales ou spatiales élémentaires considérées.

Quand, pour modéliser un phénomène donné, on prend en compte plusieurs niveaux d'agrégation ou une série de résolutions spatiales emboîtées, la modélisation est multi-échelle. Quand on représente les variations du phénomène à travers les niveaux d'agrégation ou les résolutions spatiales, la modélisation est trans-échelle.

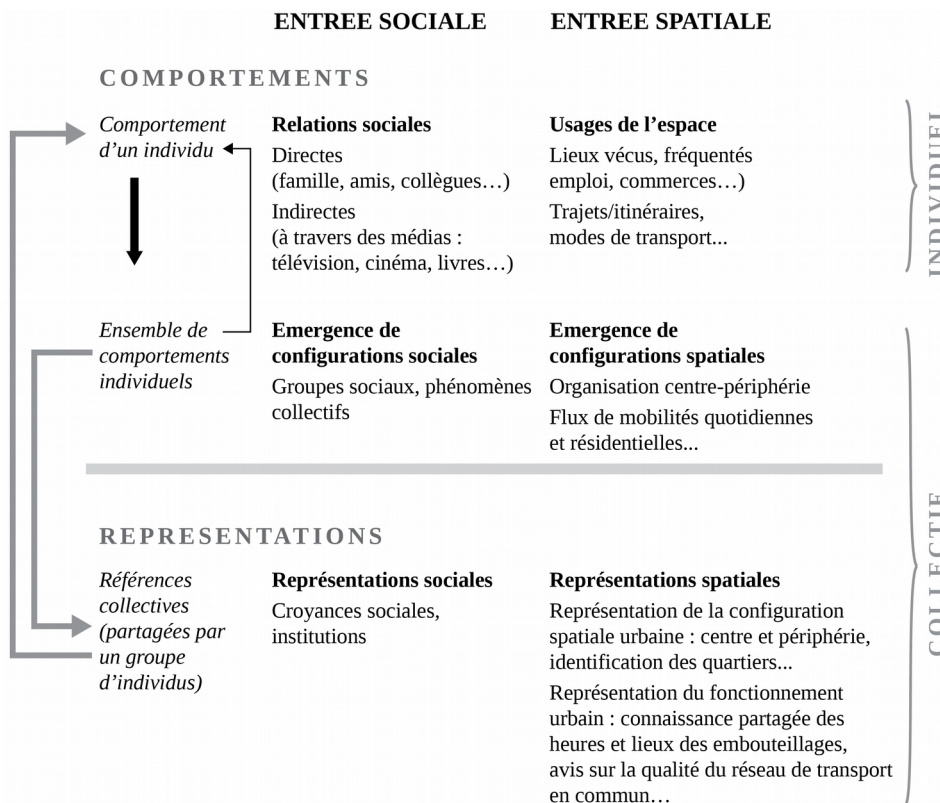
4.2 Interactions entre entités élémentaires et configurations socio-spatiales émergentes

La notion d'émergence a été initialement étudiée dans l'approche holistique des systèmes : le tout est plus que l'ensemble des parties. De nombreux modèles permettent de simuler l'émergence de configurations spatio-temporelles à un niveau agrégé à partir de règles simples au niveau des entités élémentaires modélisées. Ces configurations émergentes présentent des propriétés qui ne peuvent pas être déduites des conditions initiales du système modélisé. L'émergence de nouvelles configurations ne signifie pas forcément une modification dans la nature même des interactions ou l'apparition d'un mode de fonctionnement nouveau ; elle résulte souvent d'une évolution de l'intensité des relations entre les entités élémentaires. Lorsque le système se situe à proximité de plusieurs attracteurs possibles (c'est-à-dire qu'au niveau agrégé, les configurations émergentes peuvent être fondamentalement différentes), une petite fluctuation des valeurs introduites dans le système peut entraîner un changement brusque de son comportement. Les recherches en informatique dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée (automates cellulaires et systèmes multi-agents) reconnaissent généralement que la condition de l'émergence de nouvelles configurations au niveau agrégé est la dualité agent/environnement, l'environnement d'un agent étant tout ce qui n'est pas lui et faisant référence à la composition et l'organisation spatiale de l'espace environnant, proche ou lointain. On ne peut pas séparer l'action des agents dans leur environnement de leur perception de cet environnement ; comme les actions des agents modifient leur environnement, de nouvelles configurations socio-spatiales émergent et celles-ci contraignent en retour le comportement des agents.

« Différents auteurs distinguent l'émergence faible, où des structures macroscopiques peuvent être observées de l'extérieur comme fruit de processus microscopiques, de l'émergence forte où les dynamiques des niveaux microscopiques s'adaptent en retour aux structures des niveaux macroscopiques qu'elles ont générées et qu'elles observent de l'intérieur (Livet, Müller, Phan, Sanders 2010). De fait, les systèmes sociaux sont caractérisés par des interactions intenses et constantes entre les représentations et les comportements individuels des agents et les références collectives du ou des groupes auxquels ils appartiennent. Par son appartenance ou non à un groupe social ou à un lieu, chaque individu participe à la construction des références collectives qui s'y réfèrent (émergence faible). En retour, l'adoption ou non de ces références collectives influence son comportement (émergence forte) » (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio 2017).

Ainsi, les références collectives sont à la fois engendrées par les comportements individuels et influencent les comportements individuels (Figure 2). L'influence des références collectives s'observe tant sur les facteurs qui poussent l'individu à changer de lieu ou de comportement spatial, que sur les facteurs qui l'orientent vers le choix de tel ou tel lieu ou comportement (Tannier, Morer, Ansel 2012).

Figure 2. Interactions entre comportements individuels et références collectives. Adapté de C. Tannier, M. Morer, D. Ansel (2012).



Pour modéliser les processus de concentration et de dispersion des implantations humaines, deux formes d'expression permettent de simuler une émergence forte correspondant au fait que chaque agent pense son environnement et réagit à l'image qu'il se forme du monde dans lequel il vit : il s'agit des systèmes mathématiques dynamiques et des systèmes informatiques multi-agents.

« Dans un système multi-agent, celle-ci [l'émergence forte] peut être modélisée par l'introduction d'un agent virtuel, qui correspond à une image du monde et non à un signal envoyé par un agent, avec lequel chaque agent microscopique peut interagir éventuellement de façon singulière. Un tel agent virtuel est une description macroscopique de tout ou partie du système social dans son ensemble. Dans un système mathématique dynamique, l'émergence forte peut aussi être représentée: par la prise en compte d'une référence collective sous la forme d'une variable globale du système (Nadal & Gordon 2005), par la modélisation dynamique des interactions entre comportements individuels et références collectives à une échelle plutôt agrégée (Weidlich 2000-2006), ou encore par la prise en compte directe des interactions sociales dans la modélisation des comportements individuels (Akerlof 1997) » (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio 2017).

Conclusion du chapitre 1

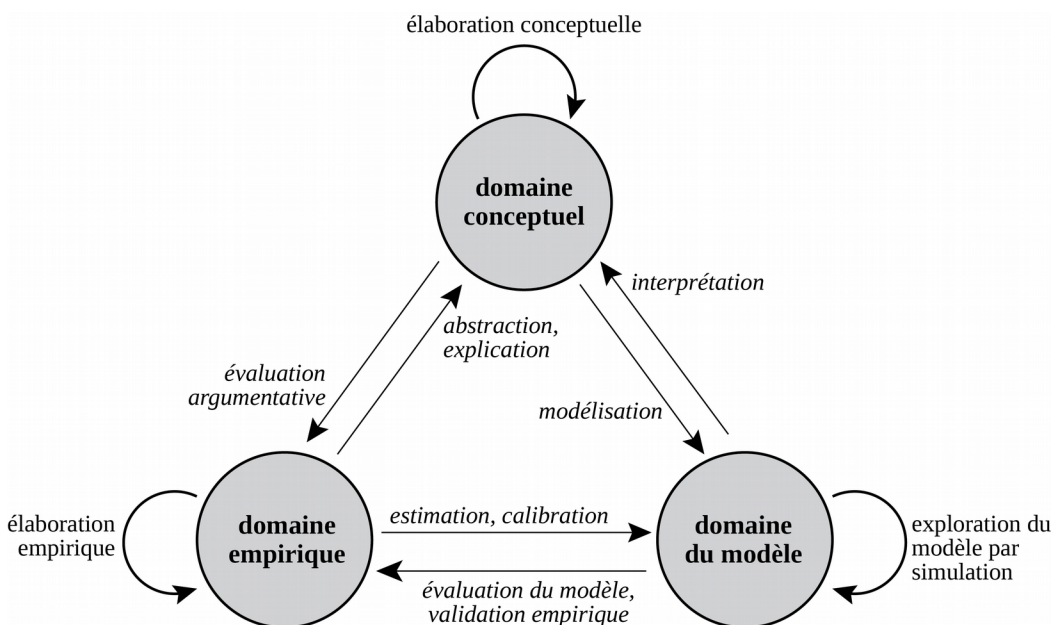
Les trois principes fondamentaux et les cinq lois énoncés au début de ce chapitre sont à la base des modèles pour l'analyse et la simulation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines qui sont présentés et discutés dans la suite de ce mémoire. Ces modèles intègrent aussi le contenant spatial et le contenu social des lieux et tiennent compte du caractère multi-échelles, voire dépendant d'échelles, des formes et des processus modélisés. Ce faisant, pour certains d'entre eux, ils permettent de simuler une émergence forte, où les entités de niveau micro-géographique observent les configurations méso- ou macro-géographiques qu'elles ont contribué à créer et s'y adaptent en retour.

Chapitre 2

Simulation de dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines : étude de trois modèles dans leur rapport à la théorie et à l'empirique

Dans une réflexion sur la modélisation à base d'agents en sciences sociales, P. Livet, J.-P. Müller, D. Phan et L. Sanders (2010) ont établi une distinction entre le "domaine empirique", duquel relève le recueil de données et d'observations, le "domaine conceptuel", qui rassemble les connaissances théorisées sur l'objet d'étude, et le "domaine du modèle" qui est un ensemble de lois et de règles organisées pour représenter certains aspects de l'objet d'étude (Figure 3). Selon ce cadre conceptuel, un modèle, pour répondre à une question sur un objet, met en relation des données ou observations du domaine empirique et des connaissances théoriques (domaine conceptuel).

Figure 3. Les trois domaines en jeu dans la modélisation en sciences sociales. D'après P. Livet, J.-P. Müller, D. Phan, L. Sanders (2010).



Comme pointé du doigt par P. Livet *et al.* (2010), les ontologies du domaine empirique (ce qui est observé et mesuré), celles du domaine conceptuel (ce qu'en dit la théorie) et celles du domaine du modèle (ce qu'en dit le modèle) peuvent ne pas coïncider et présenter des incohérences mutuelles. Une ontologie consiste en la description d'un domaine en identifiant les *entités pertinentes* (objets (êtres humains, communes, villes...), propriétés, relations, événements et processus) ainsi que les

opérations (mesures, fonctions) qui peuvent être opérées sur ces entités (Livet, Müller, Phan, Sanders 2010 ; Mathian & Sanders 2014). Afin de vérifier la cohérence entre les hypothèses thématiques à la base d'un modèle de simulation et le modèle tel qu'il a été implémenté, P. Livet *et al.* (2010) proposent d'effectuer un "test ontologique". Ce test consiste d'abord à expliciter les ontologies des trois domaines (domaine empirique, domaine conceptuel et domaine du modèle) puis à s'assurer de leur cohérence. L'objet de ce chapitre est de tenter un tel "test ontologique" pour trois modèles.

Le premier des trois modèles s'intitule SimFeodal. Il permet de simuler, pour une région donnée d'Europe du Nord-Ouest entre 800 et 1100, le prélèvement de redevances par les seigneurs auprès des foyers paysans, la construction d'églises et de châteaux, ainsi que les changements successifs de localisation des unités d'exploitation des foyers paysans. Les résultats de simulation montrent la concentration et la fixation des unités d'exploitation autour des églises et des châteaux. L'intensité de la polarisation et de la hiérarchisation du système de peuplement est variable selon les scénarios simulés.

Le deuxième modèle, MobiSim-DR, permet la simulation prospective (pour un horizon temporel aux alentours de 2030) de la construction de nouveaux bâtiments résidentiels dans une région urbaine. Les types de bâtiments construits, les logements qu'ils contiennent et leur localisation répondent à une série d'objectifs en matière de hiérarchie dans la taille des unités de peuplement, de densité bâtie et d'accessibilité aux commerces et services, aux stations de transport en commun et aux infrastructures vertes et de loisir. Les résultats de simulation montrent les lieux de concentration ou de dispersion des développements résidentiels construits par simulation.

Le troisième modèle, MobiSim-MR, permet la simulation prospective (pour un horizon temporel aux alentours de 2030) des migrations résidentielles des ménages dans une région urbaine. Les résultats de simulation montrent les changements de concentration de différents types de ménages en différents lieux (quartiers, communes, secteurs...) de la région urbaine représentée, ainsi que l'évolution de l'intensité des flux migratoires entre ces lieux.

Les trois modèles ont été développés dans un formalisme multi-agent. Ils sont donc dynamiques par itérations successives. Les dynamiques simulées concernent des étendues temporelles différentes : la dynamique de SimFeodal est ancrée sur une période de 300 ans, tandis que celle de Mobisim-MR et MobiSim-DR l'est sur une période de 20 à 30 ans selon les scénarios. La résolution temporelle (durée d'un pas de simulation) du premier est de vingt ans tandis qu'elle est d'un an pour les deux autres.

Dans ce chapitre, l'ontologie du domaine conceptuel qui sera confrontée à l'ontologie du domaine de chacun des trois modèles correspond aux principes fondamentaux et aux lois pour la modélisation des formes et processus de concentration et de dispersion des implantations humaines exposés dans le chapitre précédent. Les rapports de chaque modèle avec le domaine empirique seront également étudiés, tant pour la conception du modèle que pour l'interprétation des résultats de simulation.

1. Description synthétique des trois modèles

Le modèle SimFeodal⁹ a été conçu dans le cadre du projet ANR TransMonDyn (2011-2015), dirigé par L. Sanders. Il est décrit dans le chapitre d'ouvrage de R. Cura, C. Tannier, S. Leturcq, E. Zadora-Rio, E. Lorans, X. Rodier (*sous presse*). Les modèles MobiSim-MR¹⁰ et MobiSim-DR¹¹ ont été conçus dans le cadre du projet PREDIT *Mobisim 2 – Une plateforme de simulation pour l'étude prospective des mobilités quotidiennes et résidentielles dans les agglomérations françaises et européennes* (2009-2011), dirigé par J.-P. Antoni. Ils sont décrits respectivement dans les articles de C. Tannier, J. Hirtzel, R. Stephenson, A. Couillet, G. Vuidel, S. Youssoufi (2016) et C. Tannier, M. Bourgeois, H. Houot, J.-C. Foltête (2016).

1.1 Entités modélisées

Les agents d'un système multi-agents peuvent relever de différents niveaux. Par exemple, dans un modèle donné, les agents peuvent être des ménages tandis que les quartiers d'une ville constituent le contexte dans lequel les agents "ménages" sont localisés et interagissent ; dans un autre modèle, les quartiers peuvent être des agents. Ils constituent dans ce cas l'entité élémentaire de modélisation et sont davantage qu'une simple agrégation des ménages qui y résident (Mathian & Tannier 2015). Ceci a amené I. Benenson I Omer et E. Hatna (2002) à proposer la dénomination de "modèles entités-centrés" plutôt que celle habituelle de "modèles individus-centrés".

Pour caractériser efficacement les entités d'un modèle multi-agent, L. Sanders (2007) a suggéré de différencier le point de vue thématique du point de vue méthodologique. D'un point de vue méthodologique, les entités élémentaires sont distinguées des entités méso- ou macroscopiques qui consistent en l'agrégation d'entités élémentaires. D'un point de vue thématique, chaque catégorie d'entités relève d'un niveau d'organisation donné : micro-géographique (foyers, unités d'exploitation...), méso-géographique (quartiers, communes, autres catégories d'unités de peuplement...) ou macro-géographique (région urbaine, système de villes). Cette différenciation va nous aider à caractériser les entités des modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR.

Dans le modèle SimFeodal, les entités sont soit spatiales, possédant à ce titre des coordonnées géographiques et une topologie, soit socio-spatiales (Tableau 4). Elles ont été définies sur la base des travaux menés sur la Touraine à partir des sources textuelles et archéologiques existantes pour la période (Zadora-Rio 2008). L'objectif du modèle est de simuler l'impact des transformations politiques et sociales de la période 800-1100 sur la configuration spatiale du peuplement rural à un niveau d'analyse régional. Le choix a donc été fait de sélectionner uniquement les entités ayant une influence spatiale directe et d'écartier celles qui soit, n'ont pas d'influence spatiale directe (par exemple, le monde marchand), soit n'ont pas de représentation spatiale à une échelle régionale (par exemple, l'autorité centrale (roi ou empereur) et le Saint-Siège).

Les paysans, majoritaires dans la population, sont représentés au moyen d'agents "Foyers Paysans".

« Les foyers paysans ont une représentation spatiale, correspondant à leur unité d'exploitation. Il s'agit d'une abstraction, ne serait-ce que parce que les foyers paysans

9 Conception : R. Cura, C. Tannier, S. Leturcq, E. Zadora-Rio, E. Lorans et X. Rodier. Développement informatique avec la plateforme GAMA.

10 Conception : C. Tannier, J. Hirtzel et G. Vuidel. Développement informatique en Java.

11 Conception : C. Tannier et G. Vuidel. Développement informatique en Java.

sont considérés comme persistants sur l'ensemble de la durée de la transition, s'approchant plus de la durée de vie du bâti que de celle de ses habitants. Leur comportement dans le modèle représente uniquement les processus qui les poussent à modifier leur localisation.

De la même manière et avec un niveau d'abstraction semblable, les puissants sont modélisés via des agents "Seigneurs". Ceux-ci traversent l'ensemble de la période, et tendent ainsi à être représentatifs des charges qu'ils détiennent plutôt que des individus à proprement parler, en particulier quand il s'agit de seigneurs ecclésiastiques. Les petits seigneurs sont localisés dans l'espace modélisé et ont un rayon d'action limité autour de leur localisation tandis que les grands seigneurs ne sont pas localisés en un point de l'espace modélisé et peuvent intervenir en tous lieux. Les actions des seigneurs correspondent à la création d'entités spatiales dépendant d'eux. Il s'agit des "Zones de Prélèvement", représentations spatiales des logiques de collecte de droits et redevances, et instruments de constitution de leur puissance. Les zones de prélèvement sont de forme circulaire et de rayon très variable (de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres). Les taux de prélèvement qui leur sont associés sont également variables. Quatre types de droits et redevances y sont collectés : loyers (terres exploitées), droits de haute justice (crimes de sang...), droits de basse et moyenne justice (contentieux...), droits banaux (utilisation des moulins, des fours...) » (Cura et al. sous presse).

Tableau 4. Les entités du modèle SimFeodal.

Nom	Variétés	Type	Activité	Niveau	
				Point de vue méthodologique	Point de vue thématique
Foyer Paysan	Mobile localement et sur de longues distances (paysan libre)	Socio-spatial	Actif	Élémentaire	Micro-géographique
	Mobile localement uniquement (serf, esclave)				
Seigneur	Grand Seigneur	Social	Actif	Élémentaire	Micro-géographique
	Petit Seigneur	Socio-spatial			
Zone de Prélèvement	Loyers	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
	Droits de haute justice				
	Droits de basse et moyenne justice				
	Droits banaux				
Attracteur (effectif ou potentiel)	Paroisse avec son église	Socio-spatial	Actif	Élémentaire	Micro-géographique
	Église sans statut paroissial	Spatial	Passif		
	Château	Spatial	Passif		
	Communauté villageoise	Spatial	Passif		
Agrégat de population	Village	Spatial	Passif	Mésoscopique	Mésogéographique
	Agglomération (bourg, petite ville)				
Pôle d'attraction		Spatial	Passif	Mésoscopique	Mésogéographique

Les agents "Attracteurs" sont des entités spatiales ponctuelles. Les pôles d'attraction consistent en l'agrégation d'un ou plusieurs attracteurs proches les uns des autres. Les agents "Agrégats de population" sont des entités spatiales génériques incluant villages et villes ; ils consistent en des ensembles d'au moins cinq foyers paysans proches les uns des autres.

« Chaque catégorie d'agents a des caractéristiques et des comportements différents. Les agents spatiaux sont localisés dans l'espace modélisé. Les agents sociaux (ou socio-spatiaux) représentent des entités sociales sur le plan historique. Les agents actifs se déplacent (c'est le cas des agents "Foyers paysans"), ou bien créent ou modifient d'autres agents (les agents "Seigneurs" peuvent créer des agents "Châteaux" et "Zones de prélèvement" ; les agents "Paroisses" peuvent modifier le contour des ressorts paroissiaux de leurs voisines) » (Cura et al. sous presse).

Dans le modèle MobiSim-MR (Tableau 5), les seules entités ayant un rôle actif sont les ménages, qui peuvent choisir de déménager pour s'installer dans un autre logement. Ménages et logements sont des entités spatiales indirectement : elles héritent des coordonnées géographiques (mais non de la topologie) des bâtiments qui les abritent, les logements de par leur rattachement à un bâtiment (chaque bâtiment contient 1 à n logements), et les ménages de par leur rattachement à un logement (chaque logement contient 0 ou 1 ménage). Ménages et logements sont potentiellement très divers ; la combinaison de toutes les modalités de leurs attributs (coût, statut d'occupation, taille et type pour les logements ; âge, revenus, composition familiale, nombre d'enfants et styles de vie pour les ménages) permet de distinguer 54 types de logements et 576 types de ménages.

Tableau 5. Les entités du modèle MobiSim-MR

Nom	Type	Activité	Niveau	
			Point de vue méthodologique	Point de vue thématique
Ménage	Socio-spatial	Actif	Élémentaire	Micro-géographique
Logement	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Bâtiment	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Zone circulaire servant à déterminer le type d'environnement résidentiel (urbain ou rural) d'un bâtiment	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Zone circulaire servant à calculer de la part de surface en forêt autour d'un bâtiment	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Zone circulaire servant à calculer de la part de surface bâtie autour d'un bâtiment	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Bordure urbanisée (limite ville-campagne)	Spatial	Passif	Élémentaire	Méso-géographique

Tableau 6. Les entités du modèle MobiSim-DR

Nom	Type	Activité	Niveau	
			Point de vue méthodologique	Point de vue thématique
Logement	Spatial	Passif	Élémentaire	Micro-géographique
Bâtiment	Spatial	Actif	Élémentaire	Micro-géographique
Unité de peuplement	Spatial	Passif	Élémentaire	Méso-géographique

Le modèle MobiSim-DR contient uniquement des entités spatiales (Tableau 6). Comme dans MobiSim-MR, un logement est une entité indirectement spatiale, via son rattachement à un

bâtiment. Il existe deux types de bâtiments, dont le comportement est identique : les maisons individuelles (qui contiennent un seul logement) et les immeubles collectifs (qui contiennent plusieurs logements). Le bâtiment est une entité active dans le sens où, à sa création dans le modèle, elle "choisit" sa localisation au sein d'une unité de peuplement. Une unité de peuplement peut correspondre à n'importe quelle entité de niveau méso-géographique : commune, quartier, secteur d'une agglomération, tache urbaine (agrégat bâti)...

La comparaison des tableaux 4, 5 et 6 permet de mettre en évidence les points communs et différences entre les trois modèles relatifs aux entités qu'ils comportent. Dans les trois modèles, les entités relèvent de deux niveaux (micro-géographique et méso-géographique) du point de vue thématique. Seules certaines entités sont des agents c'est-à-dire qu'elles ont la capacité d'agir (agentivité telle que définie dans (Livet 2005)). Ces entités-agents sont toutes de niveau élémentaire d'un point de vue méthodologique, et de niveau micro-géographique d'un point de vue thématique. Le modèle SimFeodal est le seul à comporter des entités de niveau mésoscopique (point de vue méthodologique), consistant, par définition, en l'agrégation d'entités de niveau élémentaire (cf. chapitre 1, section 2). Ces entités agrégées (pôles d'attraction et agrégats de population) n'ont pas la capacité d'agir mais, comme nous le verrons ci-après, elles exercent une grande influence sur le comportement des entités-agents élémentaires (foyers paysans, seigneurs et paroisses).

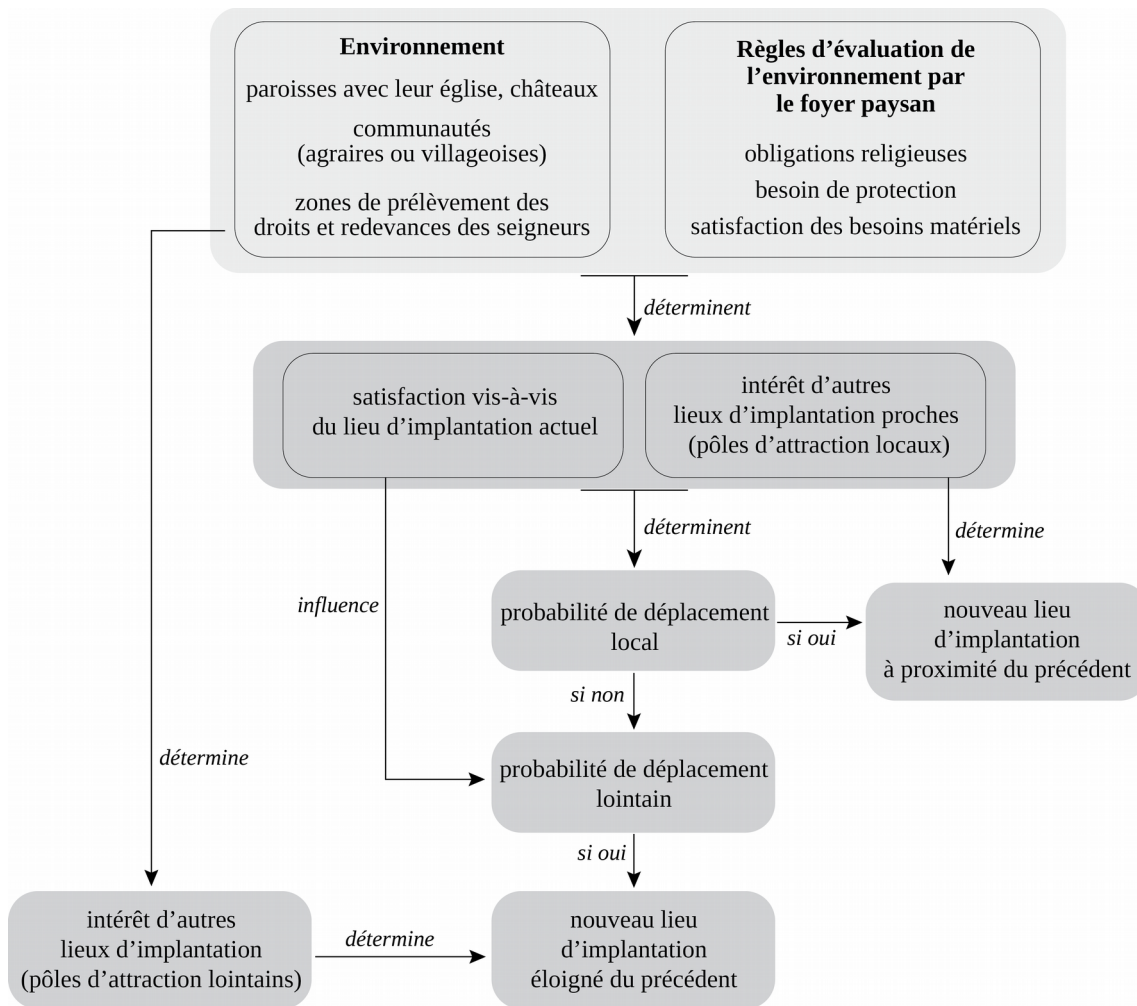
1.2 Dynamiques à l'œuvre

Dans le modèle SimFeodal, les foyers paysans ont la possibilité de se déplacer (*i. e.* de modifier la localisation de leur unité d'exploitation) à chaque pas de simulation. Leurs déplacements s'effectuent à destination des pôles les plus attractifs situés à proximité ou, plus rarement, sur de plus longues distances (Figure 4). Un pôle d'attraction est constitué d'un ou plusieurs attracteurs (églises paroissiales, châteaux et communautés villageoises) proches les uns des autres. Les serfs, qui n'avaient pas le droit de quitter les terres de leurs seigneurs, n'ont la possibilité de se déplacer que localement.

Les châteaux et églises paroissiales sont en nombre bien plus restreint que celui des foyers paysans. En rapprochant leur unité d'exploitation de ces pôles, les foyers paysans constituent des agrégats de population. Ces agrégats peuvent être dotés d'une communauté villageoise, laquelle augmente la satisfaction des foyers paysans localisés dans un tel agrégat. Les églises paroissiales se multiplient et modifient leur aire de desserte dans le but de satisfaire le plus grand nombre de fidèles possible. Les seigneurs construisent des châteaux et collectent des droits et des redevances auprès des foyers paysans via la création de zones de prélèvement. Au cours d'une simulation, de nouveaux droits viennent s'ajouter à ceux existants et de nouvelles zones de prélèvement sont créées, se superposant totalement ou partiellement les unes aux autres. Outre ces mécanismes de création de droits, les seigneurs assurent leur rayonnement et la fidélité de leurs vassaux par la cession de droits sur leurs zones de prélèvement ou leurs équipements. Par exemple, lorsqu'un seigneur construit un château, il peut en confier la garde, avec tout ou partie des revenus afférents, à un seigneur de moindre rang qui devient dès lors son vassal.

Tout au long de la simulation, des foyers paysans disparaissent et apparaissent, des châteaux sont construits et des églises sont érigées. Les zones de prélèvement créées et possédées par les seigneurs se multiplient, augmentant la pression fiscale sur les foyers paysans. Des agrégats de foyers paysans apparaissent, grossissent ou disparaissent.

Figure 4. Modélisation du changement de lieu d'implantation d'un foyer paysan dans le modèle SimFeodal.



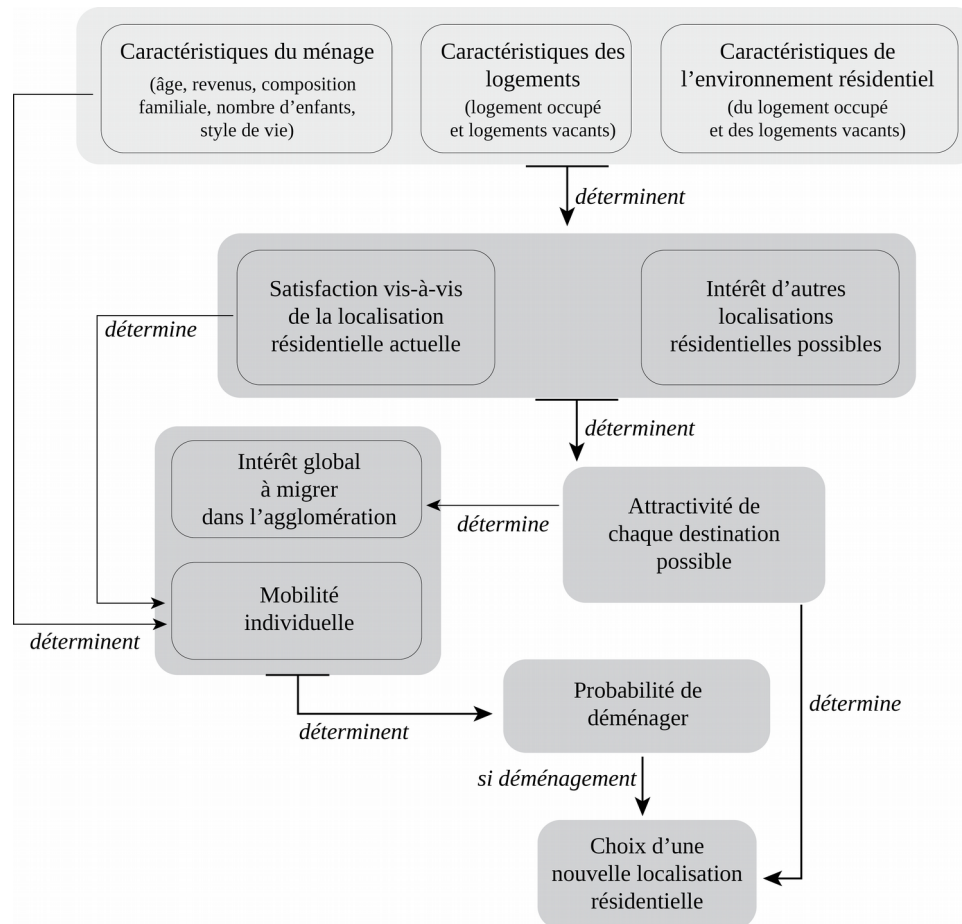
Dans le modèle MobiSim-MR, les ménages peuvent déménager et s'installer dans un autre logement à chaque pas de simulation. Comme dans le modèle SimFeodal, la migration résidentielle résulte d'une interaction *push-pull* entre des éléments qui poussent le ménage à déménager (*push*) et des éléments qui l'amènent à choisir une localisation résidentielle plutôt qu'une autre (*pull*). Pour le volet *push*, le ménage évalue sa localisation résidentielle actuelle ; pour le volet *pull*, le ménage évalue les autres localisations résidentielles possibles, indépendamment de la nécessité de l'action de migrer (Figure 5).

Le fonctionnement du marché du logement (mécanismes d'offre et de demande) n'est pas modélisé. Ce faisant, les changements de localisation des ménages résultent de différenciations spatiales en termes de site (paysage) et de situation (accessibilité aux emplois, commerces, services, espaces verts et naturels...) combinées aux caractéristiques sociales des ménages (âge des individus composant le ménage, composition du ménage, revenus, préférence pour vivre en milieu urbain ou périurbain, préférence pour se déplacer en voiture ou en transports en commun et modes doux...) (Benenson 1998).

Au cours du temps, les caractéristiques des ménages évoluent. Ceci entraîne l'évolution de leurs souhaits en matière de logement et d'environnement résidentiel. Conjointement, leur environnement

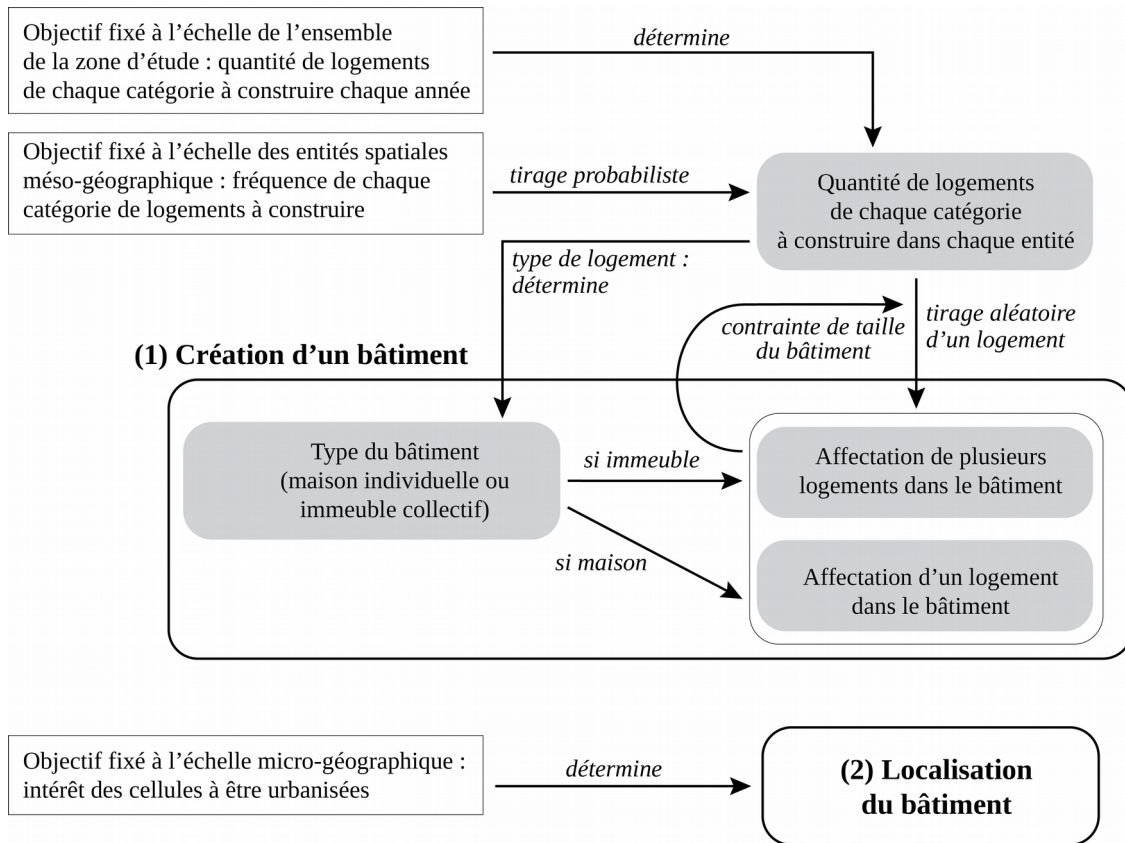
résidentiel évolue (arrivée ou départ de ménages, construction de nouveaux bâtiments résidentiels, évolution des coûts et des temps de transport...). D'où l'évolution de leur satisfaction résidentielle et de l'attrait d'autres localisations résidentielles possibles.

Figure 5. Modélisation du processus de migration résidentielle d'un ménage dans le modèle Mobisim-MR.



Dans le modèle MobiSim-DR, le processus de création de nouveaux bâtiments résidentiels et d'affectation des logements dans les bâtiments construits par simulation comporte trois volets (Figure 6). En premier lieu, à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude (échelle macro-géographique), on fixe l'objectif en matière de nombre total de logements à créer par année de simulation, en fonction de leur catégorie (type : maison individuelle ou appartement dans un immeuble collectif ; taille : 1 à 2 pièces, 3 à 4 pièces, 5 pièces ou plus ; coût : faible, moyen, élevé ; statut d'occupation : propriétaire, locataire privé, locataire social). Ensuite, à une échelle méso-géographique, on définit un principe de distribution spatiale des logements créés, qui s'applique aux unités de peuplement : taches urbaines (agrégats bâtis), communes, quartiers, ou à toute autre partition spatiale de la zone d'étude. Différentes logiques de distribution de la croissance résidentielle peuvent être choisies, de manière à simuler différents scénarios de développement résidentiel, par exemple la croissance de chaque tache urbaine ou de chaque commune proportionnellement à sa population actuelle, ou bien un développement résidentiel privilégiant les taches urbaines ou les communes les plus importantes, ou encore un développement résidentiel visant à accentuer le caractère polycentrique hiérarchisé d'une agglomération.

Figure 6. Modélisation de la création d'un nouveau bâtiment résidentiel dans le modèle MobiSim-DR.



A une échelle locale (micro-géographique), de nouveaux bâtiments sont construits par MobiSim-DR de manière à accueillir tous les logements précédemment créés. Les bâtiments sont créés un par un dans chaque unité de peuplement successivement, jusqu'à ce que tous les logements soient affectés à un bâtiment. Un bâtiment de type "immeuble collectif" accueille plusieurs logements correspondant à un nombre total de pièces fixé en début de simulation (30 pièces par défaut). Quand, à la fin d'un pas de simulation, un immeuble n'est pas totalement rempli de logements, il l'est au pas de simulation suivant.

La dernière étape du processus consiste en la localisation des bâtiments nouvellement créés, dans des lieux d'implantation identifiés comme étant urbanisables et caractérisés par leur intérêt à être urbanisés. Ces lieux d'implantation potentielle sont représentés cartographiquement sous la forme de cellules carrées géolocalisées de 20 m. de côté environ, ce qui correspond approximativement, pour des villes françaises de taille moyenne, à l'emprise au sol d'une maison individuelle entourée de son jardin. Sur cette base, les bâtiments créés par MobiSim-DR sont localisés un par un dans les cellules libres les mieux évaluées de chaque unité de peuplement, en commençant par les cellules les plus intéressantes à être urbanisées. S'il n'y a plus de cellules libres dans une unité de peuplement, MobiSim-DR place les bâtiments dans les cellules libres les plus proches possibles de l'unité concernée.

2. Confrontation de l'ontologie du domaine du modèle avec l'ontologie du domaine conceptuel

Le socle théorique et conceptuel exposé dans le chapitre 1 (section 1.2) comporte cinq lois générales pour la modélisation des processus et des formes de concentration et de dispersion des implantations humaines au sein d'un système de peuplement. Le tableau 7 associe à chaque loi les variables et mécanismes qui permettent, dans chacun des modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR, de représenter les dynamiques de concentration et de dispersion des foyers paysans, des ménages et des bâtiments (abritant des logements), respectivement.

Tableau 7. Variables et mécanismes correspondant à à chaque loi dans chacun des modèles.

	SimFeodal	MobiSim-MR	MobiSim-DR
Loi 1. Friction de la distance	Distance à l'église paroissiale et au château les plus proches. Distance au pôle le plus attractif localement, <i>i.e.</i> dans un rayon de 2,5 km.	Distance au parc ou square le plus proche. Distance à la bordure urbanisée. Accessibilité généralisée à l'emploi. Temps et coût d'accès au centre-ville.	
Loi 2. Rôle de l'appartenance à un même milieu	Appartenance d'un foyer paysan à un agrégat de population possédant ou non une communauté agraire ou rurale. Appartenance d'un foyer paysan à différentes zones de prélèvement de droits et redevances seigneuriaux.	Rôle des attributs de l'environnement résidentiel : nombre de ménages à hauts revenus, de commerces et services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, et de stations de transport en commun ; caractéristiques paysagères ; type d'environnement résidentiel (urbain ou rural).	Nombre de logements et de bâtiments créés, de chaque catégorie, propre à chaque unité de peuplement (commune, quartier, tache urbaine...) Intérêt des cellules à être urbanisées dans ou à proximité de l'unité de peuplement à laquelle appartient un bâtiment.
Loi 3. Influence de la taille des entités considérées	Création des attracteurs (châteaux et églises paroissiales) dépendant en partie du nombre de foyers paysans présents dans l'agrégat. Attraction d'un pôle égale à la somme des attractivités des attracteurs le composant.	Pour chaque ménage, valeur médiane d'attractivité des logements connus (plus le nombre de logements attractifs est élevé, plus le ménage a de chances d'augmenter sa satisfaction résidentielle en déménageant).	Dépendance de l'intensité du développement résidentiel dans chaque unité de peuplement à la taille de celle-ci.
Loi 4. Dépendance d'échelles	Modélisation multi-échelle : superposition de multiples voisinages plus ou moins étendus, dont chacun définit l'enveloppe d'une catégorie d'interactions potentielles.		Modélisation multi-échelle : règles de création des logements et des bâtiments relevant de trois niveaux d'organisation (macro-, méso- et micro-géographiques).
Loi 5. Dépendance dans le temps		Modèle dynamique par itérations	

Le modèle MobiSim-DR se distingue des deux autres modèles par l'absence de variable ou de mécanisme correspondant à la loi de friction de la distance et une représentation différente de la loi de dépendances d'échelles. Les réflexions qui suivent vont permettre de décrire et de comprendre les causes et les implications de ces deux différences.

2.1 Interactions agents-environnement et influences exogènes

La notion d'environnement est au cœur de la dynamique des modèles multi-agents (les agents réagissent à et/ou interagissent avec leur environnement), et la dimension spatiale y joue un rôle fondamental. Dans les trois modèles étudiés ici, l'environnement est composé d'entités spatiales représentées de manière explicite et absolue au moyen d'une géométrie et de coordonnées géographiques. Ces entités peuvent être ponctuelles (par exemple, des commerces et services dans Mobisim-MR ou des châteaux dans SimFeodal) ou bien surfaciques (par exemple des paroisses dans SimFeodal ou des cellules caractérisées par leur intérêt à être urbanisées dans MobiSim-DR). La sélection des entités spatiales ou socio-spatiales qui composent l'environnement d'une entité-agent donnée se fait au moyen d'une explicitation de leurs relations dans l'espace via la définition d'un voisinage spatial. Ce voisinage représente soit une proximité géométrique ou une accessibilité temporelle (loi 1 de friction de la distance dans le Tableau 7), soit l'appartenance à une entité spatiale (loi 2 d'appartenance à un même milieu dans le Tableau 7).

Dans MobiSim-DR, l'environnement des agents "Logements" et "Bâtiments", à savoir les unités de peuplement méso-géographiques et, au niveau micro-géographique, l'intérêt des cellules à être urbanisées, détermine la création et la localisation des agents concernés. Ni l'intérêt des cellules au niveau micro-géographique, ni les entités de niveau méso-géographique évoluent en cours de simulation. La seule modification de l'environnement des agents consiste en l'apparition de nouveaux bâtiments résidentiels et donc la suppression des cellules ayant fait l'objet d'une création de bâtiment au sein du pool de cellules intéressantes à urbaniser. Cette modification de l'environnement n'a pas d'influence sur les agents existants : une fois créés et localisés, les agents "Bâtiments" et "Logements" sont fixes. Leurs caractéristiques et leur localisation n'évoluent pas en fonction de changements dans leur environnement. Par ailleurs, aucune influence exogène ne modifie le comportement des agents en cours de simulation.

Dans SimFeodal et MobiSim-MR, en revanche, les foyers paysans ou les ménages peuvent changer de lieux d'implantation au cours d'une simulation en fonction de l'attractivité différenciée des lieux pour chacun d'eux. Cette attractivité évolue au cours du temps en fonction des modifications de leur environnement et de modification des règles de comportement des agents résultant d'inputs extérieurs à chaque modèle.

Dans SimFeodal, les modifications de l'environnement consistent en la création de paroisses, la modification des aires de desserte des églises paroissiales, l'alourdissement des ponctions seigneuriales, la création de châteaux et l'apparition de communautés agraires ou villageoises. Des influences exogènes modifient le comportement des foyers paysans en cours de simulation (Figure 7) : l'émergence d'un climat de violence interne à la région modélisée, résultant de la conflictualité croissante entre seigneurs au cours du X^e siècle, se traduit dans le modèle par l'apparition puis l'augmentation d'un besoin de protection pour les foyers paysans (ceux-ci cherchent alors à se localiser aussi près que possible d'un château pour bénéficier de sa protection) ; l'augmentation des obligations religieuses, résultant notamment du renforcement de l'encadrement ecclésiastique, se traduit, elle, par une volonté des foyers paysans de se localiser de plus en plus près des églises paroissiales.

Figure 7. Les processus historiques observés en Touraine et leur introduction dans le modèle. Adapté de (Cura *et al.* sous presse).

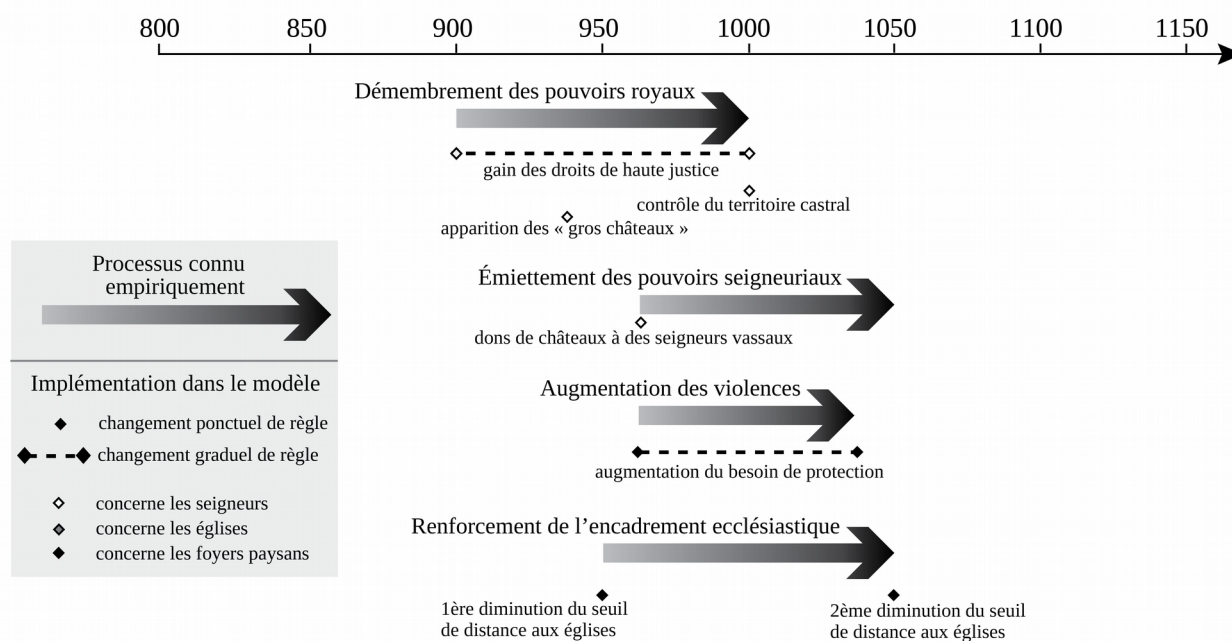
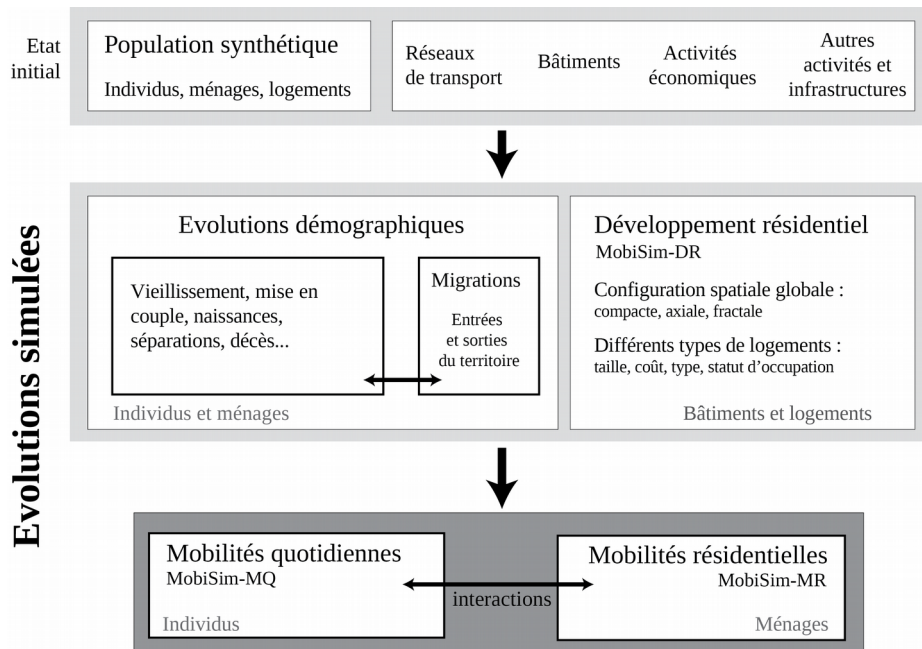


Figure 8. Place du modèle MobiSim-MR au sein de la plateforme de simulation MobiSim.



Dans Mobisim-MR, les règles de comportement des ménages, c'est-à-dire leurs appréciations des attributs des logements et de l'environnement résidentiel de ceux-ci ainsi que l'importance accordée à chacun de ces attributs, diffèrent en fonction de leurs caractéristiques socio-démographiques. Celles-ci sont définies par un modèle de micro-simulation des évolutions démographiques extérieur à MobiSim-MR (Figure 8). Au sein de ce modèle, les ménages évoluent (unions, séparations,

naissances, décès), ainsi que les individus composant chaque ménage (vieillesse, changement de statut : élève, étudiant, adulte en activité, retraité). Également extérieur à MobiSim-MR, la simulation des mobilités quotidiennes à chaque pas de simulation permet de déterminer, pour chaque ménage, un aspect de son style de vie (utilisation préférentielle de la voiture particulière ou bien des transports en commun et modes doux) ainsi que le coût et temps de transport intervenant dans le calcul de son accessibilité généralisée à l'emploi et son temps d'accès au centre-ville. Ce module de simulation des mobilités quotidiennes intègre l'évolution annuelle des prix du carburant. Enfin, le module MobiSim-DR fournit, pour chaque année de simulation, la carte des nouveaux bâtiments résidentiels construits et des logements qu'ils contiennent.

2.2 L'émergence dans les trois modèles

Dans le modèle MobiSim-DR, il n'existe pas d'interactions entre les agents. Dans les modèles SimFeodal et MobiSim-MR, en revanche, les agents interagissent via des voisinages spatiaux. Dans SimFeodal par exemple, les interactions entre foyers paysans et seigneurs se font via les zones de prélèvement : pour un seigneur, l'arrivée et le départ de foyers paysans dans le territoire qu'il contrôle modifie sa puissance et donc, la possibilité qu'il a de construire un château. Dans MobiSim-MR, l'environnement résidentiel de chaque ménage comporte d'autres ménages, des commerces, des services, des infrastructures de loisirs, etc. Ceci permet de représenter une interaction entre les ménages, via leur environnement.

L'absence d'interactions entre les agents dans MobiSim-DR s'explique par l'absence d'entités sociales (ou socio-spatiales) : le contenu social des lieux n'est pas intégré dans le modèle. En tant qu'entités purement spatiales, les logements et les bâtiments n'adaptent pas leur comportement en fonction des configurations spatiales ou socio-spatiales observées à un niveau macro- ou méso-géographique car seules des entités sociales peuvent "observer" des configurations spatiales ou sociales émergentes (cf. chapitre 1, section 4.2). Cependant, la configuration spatiale méso-géographique (i.e. la localisation des bâtiments existants dans chaque unité de peuplement) contraint la localisation des nouveaux bâtiments créés. Le modèle MobiSim-DR simule donc une émergence faible. Par ailleurs, le modèle MobiSim-DR ne comporte pas de variable ou de mécanisme correspondant à la loi de friction de la distance. En effet, l'existence d'une friction de la distance suppose un mouvement entre deux positions or nous avons vu, dans la section précédente, que les agents "Bâtiments" et "Logements" sont fixes une fois créés. Ce faisant, à un niveau macro-géographique, l'évolution des concentrations et des dispersions de bâtiments résulte uniquement de l'apparition de nouveaux bâtiments¹² et non du mouvement des agents dans l'espace.

Inversement, dans les modèles SimFeodal et MobiSim-MR, l'évolution des concentrations et dispersions des implantations au cours du temps créent et sont créées par les mouvements des agents dans l'espace physique et social (changements de position sociale et/ou spatiale) (cf. chapitre 1, section 3). Dans SimFeodal, les foyers paysans qui ont été sélectionnés pour changer de lieu d'implantation "observent" les attractivités des différents pôles d'attraction (localement ou dans tout l'espace modélisé selon que leur déplacement est local ou lointain) pour choisir leur nouvelle localisation. Cette "observation" est représentée formellement dans le modèle par l'introduction, dans le tirage aléatoire servant à déterminer le nouveau lieu d'implantation d'un foyer paysan, d'une pondération de la probabilité de sélectionner chaque pôle par son attractivité relative. De par le fait que les foyers paysans "observent" la configuration macroscopique des attractivités des différents pôles, le modèle SimFeodal simule une émergence forte. MobiSim-MR simule lui aussi une émergence forte car chaque ménage "connaît" la valeur médiane des attractivités de tous les

¹² Le modèle ne simule pas d'éventuelles destructions de bâtiments.

logements pour tous les ménages à l'initialisation du modèle et positionne, par rapport à elle, sa propre valeur médiane d'attractivité des logements connus (au nombre de 30 par défaut). La comparaison des attractivités des logements vacants intervient dans la probabilité de déménager et dans le choix d'un nouveau logement dans MobiSim-MR ; la comparaison des attractivités des pôles intervient dans la probabilité de déplacement local (et non lointain) et dans le choix d'un nouveau lieu d'implantation dans SimFeodal. La différence entre MobiSim-MR et SimFeodal est qu'un ménage ne peut emménager que dans un des logements qu'il connaît parmi l'ensemble des logements vacants tandis qu'un foyer paysan peut s'implanter dans n'importe quel pôle de la zone d'étude (sauf les serfs qui n'ont la possibilité de se déplacer que localement).

La connaissance de la configuration macro-géographique des attractivités constitue une référence collective dans le sens où elle est partagée par tous les ménages ou foyers paysans de la zone d'étude. Elle influence en retour leurs comportements individuels. Cette référence collective est fixe dans MobiSim-MR, calculée une fois pour toute à l'initialisation du modèle, tandis qu'elle évolue en cours de simulation dans SimFeodal. Dans MobiSim-MR, elle émerge directement des appréciations individuelles des ménages qu'elle influence. Dans SimFeodal, elle résulte des actions d'agents sur lesquels elle n'exerce pas d'influence directe, à savoir les créations de châteaux et d'églises paroissiales par les seigneurs et les paroisses, créations qui dépendent, elles, des choix de localisation des foyers paysans (la création d'un château par un seigneur dépend de sa puissance, qui elle-même résulte du nombre de foyers paysans localisés dans le territoire qu'il contrôle ; la création d'une nouvelle église paroissiale dans ou à proximité d'une paroisse existante dépend du nombre de foyers paysans localisés dans ladite paroisse).

3. Rapports aux domaines empirique et conceptuel pour la conception des trois modèles

P. Livet *et al.* (2010) identifient quatre phases dans la modélisation en sciences sociales, qui relient le domaine du modèle aux domaines empirique et conceptuel (Figure 3) :

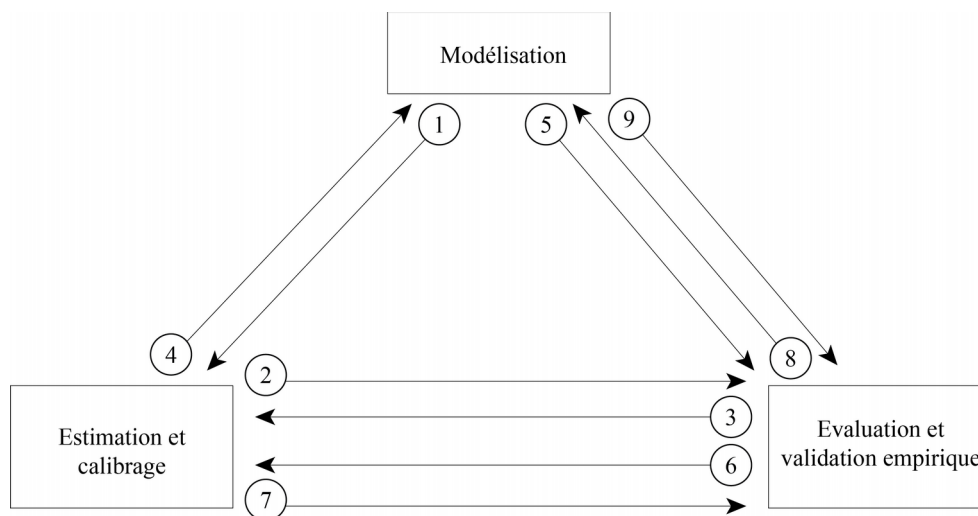
- *la modélisation*, qui implique une relation du domaine conceptuel vers le domaine du modèle ;
- *l'estimation et la calibration du modèle*, qui impliquent une relation du domaine empirique vers le domaine du modèle ;
- *l'évaluation du modèle et sa validation empirique*, qui impliquent une relation du domaine du modèle vers le domaine empirique ;
- *l'interprétation des résultats du modèle*, qui implique une relation du domaine du modèle vers le domaine conceptuel.

Dans ce mémoire, nous considérons que la conception d'un modèle rassemble les trois premières phases (modélisation, estimation et calibration, évaluation et validation empirique). La conception d'un modèle ne fait pas intervenir successivement ces trois phases : elle consiste en des allers-retours, qui peuvent être très nombreux, entre chacune d'elles (Figure 9). La quatrième phase, d'interprétation des résultats du modèle, intervient après sa conception et fait l'objet de la prochaine section du mémoire.

La conception de MobiSim-DR, qui est un modèle simple, a été de courte durée (environ deux mois) et a nécessité peu d'allers-retours entre chacune des trois phases. Les conceptions de MobiSim-MR et de SimFeodal, qui sont des modèles beaucoup plus compliqués, ont duré nettement

longtemps (environ deux ans pour le premier et quatre ans pour le second). La conception de MobiSim-MR s'est appuyée sur les nombreuses études statistiques, synthèses d'entretiens et modèles de simulation pré-existants sur le thème des mobilités résidentielles des ménages. L'analyse de ce corpus bibliographique et le travail initial de modélisation ont duré environ un an. Ensuite, les phases de modélisation, d'estimation et de calibrage, et d'évaluation et de validation empirique ont pris encore un an en tout. Les allers et retours entre chacune d'elles ont été assez peu nombreux, ce qui s'explique en grande partie par la durée d'une simulation avec MobiSim-MR, qui est d'environ 8h et était encore plus longue dans les premiers stades de la conception du modèle. La co-présence journalière des concepteurs du modèle dans un même lieu (le laboratoire ThéMA au centre-ville de Besançon) a facilité sa conception. Pour SimFeodal, aucun modèle (ni informatique, ni conceptuel) n'existait antérieurement sur la thématique. Par conséquent, le travail initial de modélisation, en particulier l'identification des entités du modèle et de leurs relations, a été assez long (environ deux ans). Ensuite, la conception du modèle a impliqué de nombreux allers-retours entre les trois phases de modélisation, d'estimation et de calibrage, et d'évaluation et de validation empirique. Ces nombreux allers-retours ont été possibles en raison de la rapidité d'exécution d'une simulation (quelques minutes). En revanche, le fait que les concepteurs du modèle soient localisés en trois lieux éloignés les uns des autres (Besançon, Paris et Tours) a allongé la durée nécessaire à sa conception.

Figure 9. Exemple de processus de conception d'un modèle de simulation.



3.1 La phase de modélisation

Pour un modèle de simulation informatique à base d'agents, la phase de modélisation consiste en l'identification et la sélection du ou des faits stylisés qui font l'objet du modèle, le choix des entités modélisées, le choix et la définition des comportements des agents du modèle, le choix des variables, paramètres et mécanismes utilisés pour les représenter, la formalisation des mécanismes (sous forme logique ou mathématique), et le codage informatique du modèle. Un fait stylisé est une présentation simplifiée d'une régularité empirique récurrente (Mathian & Sanders 2014), observable par exemple sous forme d'une distribution ou d'un indicateur statistique, ou encore d'une configuration socio-spatiale reconnaissable. Un fait stylisé correspond donc à une caractéristique

générale, commune à un grand nombre de lieux. Elle s'applique à des configurations socio-spatiales de niveau méso- ou macro-géographique et fait abstraction des particularités locales (caractéristiques spécifiques d'un lieu donné).

Tableau 8. Faits stylisés et les mécanismes génératifs, observés dans la réalité empirique et reconnus dans le domaine conceptuel, à la base des modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR.

SimFeodal	
<i>Faits stylisés</i>	<i>Mécanismes génératifs</i>
<p>Formation d'agrégats de foyers paysans dans une forme hiérarchisée et durable, polarisés par des châteaux ou des églises.</p> <p>Niveau de généralité : toutes les régions de l'Europe du Nord-Ouest entre 800 et 1100.</p>	<p>Émiettement et la dissémination des pouvoirs, dont témoigne la multiplication des châteaux. Apparition d'un réseau très structuré d'encadrement religieux (paroissialisation de la société). Rôles polarisateurs du château et de l'église paroissiale sur les populations locales. Organisation collective des espaces de production (terroir villageois) par les populations pour assurer une répartition équilibrée des ressources.</p>
MobiSim-MR	
<i>Faits stylisés</i>	<i>Mécanismes génératifs</i>
<p>Flux migratoires importants des ménages avec enfants de la ville-centre vers les communes périurbaines proches (ménages les plus aisés) et éloignées (ménages les moins aisés) ; concentration des ménages les plus défavorisés économiquement dans la ville-centre ; vieillissement des communes périurbaines en raison de faibles flux migratoires des ménages retraités en direction de la ville-centre.</p> <p>Niveau de généralité : de nombreuses villes françaises de taille comprise entre 100 000 et 1 000 000 d'habitants.</p>	<p>Préférences des ménages en matière de choix résidentiel (par exemple, pour de nombreux ménages, souhait d'accéder à la propriété en maison individuelle dans un environnement vert et calme) ; facilité des déplacements en voiture particulière entre les communes périurbaines et la ville-centre ; propension à déménager plus faible pour les ménages sans enfant et propriétaires de leur logement.</p>
MobiSim-DR	
<i>Faits stylisés</i>	<i>Mécanismes génératifs</i>
<p>Existence de différentes formes de développement urbain (plus ou moins étalé, polycentrique ou monocentrique, plus ou moins concentré le long des axes de transport).</p> <p>Niveau de généralité : toutes les villes d'Europe du Nord-Ouest.</p>	<p>Contrôle plus ou moins fort du développement résidentiel par les acteurs publics et choix des formes de développement visées par ceux-ci (par exemple, mise en place de <i>green belts</i>, de densités bâties maximales...); stratégies et actions des promoteurs immobiliers visant à répondre à moindre coût, donc d'effort, aux préférences déclarées ou supposées des acheteurs potentiels (parmi lesquels les investisseurs immobiliers).</p>

Le tableau 8 présente les faits stylisés et les mécanismes génératifs, observés dans la réalité empirique et reconnus dans le domaine conceptuel, sur lesquels sont basés les modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR. Les mécanismes génératifs sont décrits dans le tableau de manière

très simplifiée, voire simpliste (il s'agit en fait de groupes de mécanismes), afin d'en donner au lecteur un rapide aperçu.

« *Il est souvent beaucoup plus fécond de partir du général, du modèle, fût-ce au prix de simplifications drastiques, et de l'utiliser pour situer et comprendre le particulier. Les modèles, les règles et les lois peuvent sembler bien secs et abstraits au regard du foisonnement des merveilles du monde. Ils sont pourtant d'une importance essentielle pour le comprendre et pour éviter de s'y perdre* » (Durand-Dastès 1991).

Dans ce mémoire, nous proposons d'appliquer la distinction entre particulier (ou spécifique) et stylisé (ou général) non seulement aux faits stylisés mais aussi aux mécanismes génératifs auxquels ils sont liés. En effet, des mécanismes génératifs peuvent être généraux (dans ce cas, les valeurs des variables et paramètres impliqués dans chaque mécanisme sont communes à un ensemble de lieux) ou bien spécifiques (les valeurs des variables et paramètres sont alors propres à un lieu donné).

La conception d'un modèle nécessite de sélectionner, parmi tous les mécanismes connus empiriquement, ceux que l'on veut intégrer dans le modèle.

« *Building a model implies necessarily a simplification (the model does not describe the entire world). The crucial question is: which interactions are essential and which are not* » (Tannier, Hirtzel et al. 2016).

H. Mathian et L. Sanders (2014) précisent que le choix des objets que l'on considère comme pertinents relativement à la problématique posée constitue l'*aspect conceptuel* du processus de modélisation. L'*aspect empirique* correspond au choix des entités observables qui vont permettre d'étudier les objets d'intérêt. Le critère de choix est de disposer de suffisamment d'informations (données ou connaissances) pour être en mesure d'affecter des valeurs aux variables et paramètres intervenant dans chaque mécanisme. L'*aspect heuristique* du processus de modélisation correspond au choix de ce que l'on va observer sur les caractéristiques et les comportements des objets : les mécanismes sélectionnés sont supposés influencer le ou les faits stylisés visés (*i.e.* les configurations socio-spatiales simulées à un niveau d'analyse méso- ou macro-géographique).

Le tableau 9 décrit les données d'entrée (inputs), variables et paramètres pour chacun des modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR.

- Les inputs décrivent la configuration socio-spatiale initiale.
- Les variables de contexte représentent les influences exogènes à chacun des modèles. « *In any modelling approach, exogenous variables are required when they cannot be predicted by the model* » (Tannier, Hirtzel et al. 2016).
- Les variables et paramètres de mécanisme déterminent le comportement des agents.

Par définition, les variables (de contexte ou de mécanisme) ont des valeurs susceptibles de changer à chaque pas de simulation, ce qui n'est pas le cas des inputs. Un paramètre est un cas particulier de variable (dans l'équation $x^2+ax+b=0$, x est la variable et a et b sont les paramètres), dont la valeur reste constante dans un certain contexte. Dans le modèle SimFeodal, les valeurs de certains paramètres de mécanisme changent en cours de simulation pour représenter des évolutions de contexte. Il s'agit des paramètres d'appréciation de la distance à l'église paroissiale la plus proche et de la distance au château le plus proche ; de la distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local ; et du besoin de protection (cf. figure 7). Dans les deux autres modèles, les valeurs des paramètres ne changent pas en cours de simulation. Dans chaque modèle, le calcul de la valeur d'une variable peut faire intervenir un ou plusieurs paramètres.

Afin de parvenir à simuler l'émergence de faits stylisés, deux approches se distinguent dans le domaine de modélisation à base d'agents : l'approche KISS (*Keep It Simple Stupid*) s'intéresse à la reproduction par simulation de structures macroscopiques observées en modélisant les comportements des agents de façon très simple et possiblement très éloignée de la réalité (Axelrod 1997) ; l'approche KIDS (*Keep It Descriptive Stupid*) se focalise davantage sur les mécanismes sous-jacents et préconise de modéliser de manière la plus simple possible les comportements des agents observés dans la réalité (Edmonds & Moss 2005 ; Banos 2013).

MobiSim-DR est un modèle KISS car les mécanismes génératifs qu'il comporte (cf. figure 6 et commentaire associé) ne ressemblent pas du tout à ceux observés dans la réalité empirique et mentionnés dans le tableau 8¹³. En effet, l'objectif de ce modèle est uniquement de simuler des configurations de développement résidentiel qui soient à la fois réalistes et bien différentes les unes des autres. Les mécanismes génératifs introduits pour ce faire sont purement utilitaires et n'ont pas de visée heuristique (cf. section 5 de ce chapitre).

MobiSim-MR, lui, est un modèle KIDS car les comportements des ménages, autrement dit les mécanismes génératifs, qu'il contient sont supposés représenter, de manière simplifiée, les comportements observés en réalité¹⁴.

« Our aim is to formalize the residential choice process in a realistic manner, which explains that our model contains numerous variables. Nevertheless behaviours are represented by simple [rules]. Abstract formulations and concepts are avoided. For instance, the concepts of utility and rent calculated in market equilibrium, which seem too abstract and difficult to understand when working with planning actors, are not used. (...) »

Decisions to move are taken by households. A household is considered as an entity within which decisions are taken in a collegial way. It is assumed that the head of the household takes decisions taking into account the opinions of the other members of the household. Each dwelling is characterized by intrinsic characteristics and those of its environment. A distinction is made between the local residential environment, also known as the neighbourhood, and the overall residential environment (Benenson, 2004; Devisch, Timmermans, Arentze, & Borgers, 2009; Dieleman & Mulder, 2002; Prashker et al., 2008; Timmermans, Borgers, Van Dijk, & Oppewal, 1992). Working on these three levels of analysis – dwelling, neighbourhood environment and overall residential environment – makes the link between residential and daily household mobility simpler. (...) »

When comparing possible residential locations, a household does not assess all the possibilities in a city. Households have limited knowledge of the opportunities that exist. Accordingly, the number of residential locations evaluated by households in the model is limited (Ettema et al., 2011). Purely economic variables (housing cost, transportation cost and income) are taken into account at the same time as other variables characterizing the lifestyle and stage in the lifecycle of households. Economic variables are prominent factors but they do not fully determine individual decisions: a number of studies have shown that preferences and residential choices are only partially statistically correlated to the socio-economic and demographic characteristics of households, with the exception of their point in

13 Pour une description assez complète des mécanismes impliqués dans le processus de développement résidentiel, voir par exemple la thèse S. Kamps (2013).

14 La démarche adoptée pour définir les règles comportements des ménages dans le modèle MobiSim-MR a été abductive. L'abduction consiste à produire des hypothèses qui sont les meilleures possibles compte tenu des observations que l'on a pu faire, et retenues tant qu'elles n'ont pas été infirmées (Durand-Dastès 2014).

the lifecycle (Fernandez et al., 2005). They are thus fuzzy constraints, which might be overcome in some cases. (...)

The aim of the model is to simulate the effect of planning policies on mobility patterns and behaviours but not to simulate the economic effects of planning policies. As a consequence, it is not useful to model explicitly the housing market (supply and demand mechanisms) as do for instance Filatova et al. (2009) or Ettema et al. (2011). More generally, the modelled processes must not necessarily refer to market equilibrium (being static or dynamic) or to a set system of preferences. (...)

Without economic mechanisms, the endogenous residential dynamics results mainly from intra-urban spatial differentiations -site (landscape) and situation (accessibility to employment and amenities) – combined with the individual characteristics of the households (income, life style, age, etc.). Although economic mechanisms, in particular price formation, and economic concepts such as bid rent or hedonic prices are not modelled, the model does not deny micro-economic theories. Economic variables (household income, dwelling cost, transportation cost) are taken into account. Macro-economic phenomena (e.g. economic or financial crises) can also be taken into account throughout an exogenous change of housing costs and household incomes. (...)

At the moment of dwelling choice, the constraint of income comes into play in the same way as other fundamental factors, and necessitates a compromise. Household income is, in addition, a proxy for measuring the household's social group and how well it corresponds to its social environment. In accordance with Gärling and Friman (2002), Francescato (2002), and Ge and Hokao (2006), we also adopted the hypothesis that household lifestyles are independent of income and socio-demographic characteristics.

(...) the propensity of a household to migrate results from a combination of three variables: residential satisfaction, individual residential mobility (a function of the stage in the lifecycle) and the general benefit of moving within the city being considered. (...) migration decisions are determined by both individual factors and collective knowledge. The role of collective knowledge is modelled through the introduction (direct or indirect, through the daily mobility simulation modules) of context variables: overall characteristics of the spatial urban structure (access time to town centre, accessibility to employment), the price of petrol etc. This collective knowledge represents a large part of the residential choice in the model, notably in the assessment of the overall interest to move within the urban region under consideration. This brings into play general variables in relation to the housing market: the quality and quantity of available dwellings. Thus, a household will be pushed more towards moving if the housing market offers it good opportunities » (Tannier, Hirtzel et al. 2016).

En réalité, la décision de déménager résulte d'un processus bien plus complexe que celui représenté dans MobiSim-MR. De nombreux autres facteurs interviennent : négociations intrafamiliales, expériences passées (y compris durant l'enfance), systèmes de valeurs, attitudes... Ces phénomènes ne sont pas modélisés mais existent bel et bien. Pour tenir compte de ces aspects, il eut été possible d'introduire de l'aléa (via par exemple l'ajout d'un terme stochastique) dans le calcul de la probabilité de déménager de chaque ménage. Le choix qui a été fait n'est pas celui-ci : il a été de poser des hypothèses simplificatrices mais explicites d'un point de vue thématique.

Les mécanismes génératifs inclus dans le modèle SimFeodal ont une visée moins réaliste que dans MobiSim-MR car les comportements des agents du modèle (foyers paysans, seigneurs et paroisses entre 800 et 1100) sont empiriquement moins bien connus. Ainsi, SimFeodal combine des mécanismes KISS et des mécanismes KIDS. Par exemple, la constitution des aires de dessertes des

églises paroissiales, représentées dans le modèle au moyen de polygones de Thiessen partitionnant complètement l'espace, est un mécanisme KISS. Ces aires de dessertes ne correspondent pas à une réalité empirique en début de période de simulation : un foyer paysan pouvait en réalité fréquenter une ou plusieurs églises une à deux fois par an seulement, que ces églises aient ou non des droits paroissiaux et qu'elles soient proches ou non de son lieu d'implantation. En fin de période de simulation en revanche, les polygones de Thiessen correspondent assez bien aux ressorts paroissiaux identifiés empiriquement (Zadora-Rio 2008). Ce mécanisme devient donc dès lors KIDS. Notons que pour B. Edmonds et S. Moss (2005), nul modèle entièrement KISS ou KIDS ne saurait être suffisant ; le plus souvent, c'est une combinaison des deux qu'il faut viser (Banos 2013).

Tableau 9. Données d'entrée (inputs), variables et paramètres pour chacun des modèles.

(a) SimFeodal

Inputs (configuration socio-spatiale initiale)	<p>Nombre de foyers paysans</p> <p>Nombre et localisation des foyers paysans dispersés</p> <p>Nombre, localisation et taille des agrégats de foyers paysans</p> <p>Nombre et localisation des églises ayant des droits paroissiaux</p> <p>Nombre et localisation des églises sans droits paroissiaux</p> <p>Nombre de grands seigneurs et puissance relative de chacun</p> <p>Puissance des communautés agraires</p>
Variables de contexte	<p>Nombre de foyers paysans apparaissant et disparaissant, et localisation de ceux-ci</p> <p>Nombre et localisation des foyers paysans mobiles uniquement localement</p>
Variables de mécanisme	<p>Seigneur</p> <p>Nombre de châteaux possédés, donnés et reçus en garde</p> <p>Nombre de vassaux</p> <p>Nombre et caractéristiques des zones de prélèvement qu'il détient en propre</p> <p>Nombre et caractéristiques des zones de prélèvement qu'il contrôle (totalement ou partiellement) par cession de droits de la part d'autres seigneurs</p> <p>Montant des redevances perçues</p> <p>Foyer paysan</p> <p>Montant des redevances acquittées</p> <p>Appréciation de la distance à l'église paroissiale la plus proche</p> <p>Appréciation du montant des redevances seigneuriales acquittées</p> <p>Appréciation de la distance au château le plus proche</p> <p>Appréciation de la présence d'une communauté villageoise</p> <p>Satisfaction vis-à-vis du lieu d'implantation actuel</p> <p>Probabilité de déplacement local</p> <p>Probabilité de déplacement lointain</p> <p>Paroisse</p> <p>Emprise spatiale de l'aire de desserte de l'église paroissiale</p> <p>Nombre de foyers paysans dans l'aire de desserte de l'église paroissiale et insatisfaits car trop éloignés de cette dernière</p> <p>Pour les paroisses localisées dans un agrégat, probabilité de créer une nouvelle paroisse</p> <p>Pôle d'attraction</p> <p>Attractivité du pôle</p> <p>Agrégat de foyers paysans</p> <p>Nombre de foyers paysans</p> <p>Présence ou non d'un pôle d'attraction</p>

<p>Paramètres de mécanisme</p>	<p>Seigneur Distance maximale entre un petit seigneur et le centre d'une zone de prélèvement qu'il crée Probabilité de création d'une zone de prélèvement de droits banaux ou de basse et moyenne justice par un petit seigneur Probabilité de créer un château en fonction de sa puissance Probabilité qu'un château créé par un grand seigneur le soit dans un agrégat Probabilité pour un château possédé par un grand seigneur d'être donné en garde à un petit seigneur Pour chaque château possédé, probabilité de création d'une zone de prélèvement de droits de haute justice (grand seigneur) Pour chaque château possédé, probabilité pour qu'une zone de prélèvement de droits banaux ou de basse et moyenne justice soit associée à la création d'un château</p> <p>Paroisse Pour les paroisses localisées en-dehors d'un agrégat, nombre minimum de foyers paysans insatisfaits dans l'aire de desserte de l'église paroissiale requis pour créer un nouvelle paroisse Pour les paroisses localisées en-dehors d'un agrégat, nombre d'églises non paroissiales dans l'aire de desserte de l'église paroissiale requis pour le don de droits paroissiaux à l'une d'entre elles Pour les paroisses localisées dans un agrégat, nombre minimum de foyers paysans dans l'agrégat requis pour créer une nouvelle paroisse</p> <p>Foyer paysan Paramètres d'appréciation du montant des redevances seigneuriales acquittées Paramètres d'appréciation de la distance à l'église paroissiale la plus proche Paramètres d'appréciation de la distance au château le plus proche Distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local Intensité du besoin de protection</p> <p>Château Probabilité qu'un château isolé devienne un gros château Probabilité qu'un château situé à proximité d'une église paroissiale devienne un gros château Distance minimale séparant deux châteaux</p> <p>Autres entités Attractivité de chaque catégorie d'attracteurs Distance entre les attracteurs pour la constitution des pôles Distance entre les foyers paysans et nombre minimum de foyers paysans pour la constitution des agrégats de population</p>
--------------------------------	--

(b) MobiSim-MR

<p>Inputs (configuration socio-spatiale initiale)</p>	<p>Localisation de chaque station de transport en commun Localisation et type de chaque commerce ou service Localisation de chaque parc ou square Carte géolocalisée d'occupation du sol (surfaces bâties, parkings, surfaces naturelles hors forêt, surfaces de bois et forêt, surfaces agricoles, surfaces industrielles) 1er et 3ème quartiles du coût d'accès au centre-ville en transports en commun et modes doux pour tous les ménages 1er et 3ème quartiles du coût d'accès au centre-ville en voiture pour tous les ménages 1er et 3ème quartiles de l'accessibilité généralisée à l'emploi en transports en commun et modes doux pour tous les ménages 1er et 3ème quartiles de l'accessibilité généralisée à l'emploi en voiture pour tous les ménages</p>
---	--

	<p>Médiane de l'attractivité des logements vacants pour tous les ménages 3ème quartile de la distribution des revenus des ménages dans la zone d'étude Localisation et caractéristiques de chaque logement, ainsi que des bâtiments les abritant</p>
Variables de contexte	<p>Forme de la bordure urbanisée Prix du carburant Provenant du modèle de simulation des évolutions démographiques de MobiSim : Entrées et sorties de la zone d'étude de ménages de chaque type Création de ménages par décohabitation parentale Séparations de ménages Création de ménages par séparation Décès d'individus dans certains ménages Disparitions de ménages par décès d'individu(s) Naissance d'enfant(s) dans certains ménages Provenant du modèle de simulation des mobilités quotidiennes MobiSim-MQ : Pour chaque ménage, modes de transport utilisés par chaque adulte pour chacun de ses trajets Provenant du modèle de simulation MobiSim-DR : Localisation et caractéristiques des logements nouvellement construits, ainsi que des bâtiments les abritant Évolutions ponctuelles éventuelles : Création de nouvelles stations de TC Changement de localisation de certains lieux d'emplois importants (hôpital, cité administrative...) Création ou suppression de commerces ou services</p>
Variables de mécanisme	<p>Logement Coût d'accès au centre-ville en transports en commun et modes doux Coût d'accès au centre-ville en voiture Accessibilité généralisée à l'emploi en transports en commun et modes doux Accessibilité généralisée à l'emploi en voiture Nombre de commerces et services de fréquentation quotidienne dans un rayon de 400 m. Nombre de commerces et services de fréquentation quotidienne dans un rayon de 2000 m. Nombre de ménages à revenus élevés dans un rayon de 200 m. Nombre de stations de TC dans un rayon de 400 m. Distance au parc ou square le plus proche Distance à la bordure urbanisée % de surface bâtie dans un rayon de 100 m. % de surface en forêt dans un rayon de 1700 m. Ménage Valeur d'appréciation de toutes les variables caractérisant le logement occupé et les logements vacants connus, y compris leur environnement résidentiel Satisfaction vis-à-vis du logement occupé et de son environnement résidentiel Intérêt de chaque logement vacant connu et de leur environnement résidentiel Probabilité individuelle de migrer Intérêt global à migrer</p>
Paramètres de mécanisme	<p>Logement Paramètres déterminant si l'environnement d'un logement est urbain ou rural Paramètres de calcul du coût d'un logement Ménage Paramètres des règles d'appréciation des caractéristiques des logements et des éléments de leur</p>

	<p>environnement résidentiel</p> <p>Importance de chaque caractéristique du logement occupé et de son environnement résidentiel</p> <p>Importance de chaque caractéristique des logements vacants et de leur environnement résidentiel</p> <p>Nombre de logements connus (ou visités)</p> <p>Paramètres déterminant le mode de transport préférentiel</p> <p>Paramètres déterminant la probabilité individuelle à migrer en fonction de la satisfaction résidentielle</p> <p>Paramètres déterminant l'intérêt global à migrer en fonction de l'attractivité des logements vacants connus et de la médiane de l'attractivité des logements vacants pour tous les ménages à l'état initial</p>
--	--

(c) MobiSim-DR

Inputs (configuration socio-spatiale initiale)	<p>Nombre et localisation des bâtiments existants</p> <p>Délimitation de chaque unité de peuplement</p> <p>Taille de chaque unité de peuplement</p> <p>Carte d'intérêt des cellules de 20 m. de côté à être urbanisées</p>
Variables de contexte	<p>Nombre total de logements à créer dans la zone d'étude</p> <p>Fréquence de chaque catégorie de logements à créer dans la zone d'étude</p>
Variables de mécanisme	<p>Variable aléatoire pour la répartition, entre les différentes unités de peuplement, du nombre de logements à créer de chaque catégorie</p>
Paramètres de mécanisme	<p>Nombre de pièces dans un immeuble collectif</p>

Qu'ils soient plutôt KISS ou plutôt KIDS, les modèles SimFeodal et, *a fortiori*, MobiSim-MR n'en demeurent pas moins des modèles compliqués car ils comportent de nombreuses variables et représentent de manière détaillée un nombre important de mécanismes. Ceci n'est pas le cas du modèle MobiSim-DR.

Pour chacun des trois modèles, les mécanismes et les variables impliqués déterminent l'évolution du système, simulée à partir d'une configuration socio-spatiale initiale donnée. Des mécanismes généraux peuvent amener à des configurations socio-spatiales simulées qui sont spécifiques à une zone d'étude quand la configuration socio-spatiale initiale est elle-même spécifique à cette zone, suivant l'idée que la configuration socio-spatiale initiale détermine largement son évolution (*path dependency*). De fait, l'application d'un modèle (qu'il soit spécifique ou général) à un lieu "réel", possédant à ce titre des caractéristiques générales et particulières, aboutit à des résultats de simulation qui sont eux-mêmes en partie généraux et en partie spécifiques. C'est l'application du modèle à un ensemble de lieux différents qui permet de déterminer à quel point les mécanismes généraux modélisés aboutissent à des configurations socio-spatiales simulées qui sont générales (absence d'effet des spécificités de la configuration socio-spatiale initiale) ou bien particulières (effet des spécificités de la configurations socio-spatiale initiale).

3.2 Paramétrage, évaluation et validation des trois modèles

Le paramétrage (estimation et calibrage) ainsi que l'évaluation et la validation empirique des modèles SimFeodal d'une part, et MobiSim-DR et MobiSim-MR d'autre part, ont été effectués pour deux zones d'étude : la Touraine et l'agglomération de Besançon, respectivement. Les particularités locales ont été introduites dans chacun des modèles via des valeurs spécifiques des inputs et des variables de contexte. Pour la Touraine, ces particularités locales consistent en un semis spécifique d'agréats et d'églises paroissiales pré-existants, l'existence de deux grands seigneurs de puissance quasi-équivalente et le fait que les communautés villageoises soient assez peu puissantes. Pour l'agglomération de Besançon, les particularités locales sont la quasi-absence de maisons individuelles dans la ville-centre, l'existence de maisons de petite taille (3 ou 4 pièces) et de maisons à louer uniquement dans les communes les plus éloignées de la ville-centre, et le fait que l'agglomération est extrêmement monocentrique sur les plans fonctionnel et morphologique.

Le paramétrage d'un modèle consiste à fixer les valeurs des variables et paramètres de mécanisme, au moyen d'analyses spatiales ou statistiques de données empiriques, de transcriptions de dires d'experts, ou de simulations avec le modèle. Le paramétrage comprend une phase d'estimation (statistique ou autre) des valeurs des paramètres et variables, et une phase de calibrage si celle-ci est nécessaire.

« La notion de paramétrage d'un modèle est souvent associée à celle de calibrage, et ces deux notions, bien que différentes, sont parfois confondues dans la littérature (Richiardi et al., 2006). Le calibrage consiste à tester plusieurs jeux de paramètres possibles pour une variable et à choisir l'un d'eux pour l'exécution des simulations, selon sa capacité à atteindre les objectifs définis. Il constitue ainsi une étape du paramétrage d'un modèle. Cette étape n'est pas forcément indispensable : si les valeurs initialement affectées permettent d'atteindre les objectifs du modélisateur, celui-ci n'a pas besoin de procéder à un calibrage » (Hirtzel 2015).

Dans le cas de modèles multi-agents, le calibrage automatique est souvent préconisé (Ngo & See 2012). La démarche consiste à tester et sélectionner les combinaisons de valeurs de paramètres qui permettent de produire un ou des résultats de simulation qui soient le(s) plus proche(s) possible(s) d'un objectif ou de fonctions d'objectif pré-définies (Schmitt, Rey-Coyrehourcq, Reuillon, Pumain 2015). Pour diverses raisons exposées dans la suite de ce chapitre, aucun des trois modèles étudiés n'a fait l'objet d'un tel calibrage.

L'évaluation d'un modèle consiste à vérifier que les résultats simulés sont cohérents par rapport aux hypothèses sous-jacentes à leur formalisation. Il s'agit de détecter les éventuelles incohérences dans les comportements simulés (par exemple, des catégories de ménages qui déménagent trop ou pas assez), l'incohérence de dynamiques simulées (par exemple, l'alternance non souhaitée d'augmentations et de diminutions des valeurs d'une variable en cours de simulation), ou encore les incohérences entre des modifications d'inputs du modèle et les configurations spatiales résultantes.

La validation empirique d'un modèle consiste à regarder si les résultats agrégés aux niveaux méso- ou macro-géographiques (taux de migration, flux migratoires, configurations spatiales des implantations...) sont réalistes. Quand un modèle est appliqué à une zone d'étude existant dans le domaine empirique, on compare les résultats de simulation avec des indicateurs agrégés qui

caractérisent ladite zone d'étude, ici la Touraine pour le modèle SimFeodal et l'agglomération de Besançon pour les modèles MobiSim-DR et MobiSim-MR. Un autre objectif de la validation empirique d'un modèle est de déterminer à quel point on peut faire varier le comportement des agents tout en restant dans un couloir de trajectoires possibles (Mathian & Tannier 2015). Par exemple, simuler une évolution qui amènerait la commune de Besançon à diminuer jusqu'à 10 000 habitants seulement ne fait pas partie du couloir de trajectoires faisant sens dans le domaine empirique. La validation d'un modèle de simulation inclut souvent sa capacité à reproduire des dynamiques passées, suivant l'idée que le modèle est supposé alors permettre de simuler des évolutions futures par prolongement de tendances. Ceci n'est pas le cas pour les trois modèles étudiés. Bien que les simulations des évolutions de chaque système de peuplement permettent de saisir une dynamique en cours (les ménages dans Mobisim-MR ont un certain âge, éventuellement des enfants, une certaine localisation résidentielle ; dans SimFeodal, il existe un semis initial d'églises ayant ou non des droits paroissiaux, ainsi que des petites villes qui sont des agglomérations secondaires antiques), les mécanismes modélisés ne s'appliquent qu'à la période de simulation visée (pour mémoire de 800 à 1100 pour SimFeodal et de 2015 à 2030 environ pour MobiSim).

L'évaluation et la validation des trois modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR n'a pas suivi la logique classique de validation d'un modèle statistique, qui consiste à confronter l'observé et le simulé considérant un même niveau d'agrégation. La démarche adoptée a été, au contraire, celle d'un décalage systématique entre les niveaux de modélisation d'une part, et d'évaluation et de validation d'autre part (Mathian & Tannier 2015). Par exemple pour Mobisim-MR, le niveau de modélisation est le ménage ; les niveaux de validation sont le quartier ou la commune (évolution de la population des quartiers ou communes), un macro-zonage (proportion et types de ménages en zone urbaine ou périurbaine), et l'agglomération dans son ensemble (évolution de la satisfaction résidentielle globale, nombre moyen de déménagements par ménage sur 10 ans). Ce faisant, les données empiriques utilisées pour évaluer les résultats de simulation ne relèvent pas du même niveau d'observation que celles utilisées en entrée de simulation et pour fixer les valeurs des paramètres.

La vérification d'un modèle de simulation fait aussi partie de sa conception. La vérification comprend l'analyse de la stabilité des résultats de simulation, utile uniquement quand la formalisation d'un modèle induit une certaine stochasticité, et l'analyse de la sensibilité à la modification de valeurs de paramètres¹⁵. L'analyse de stabilité relève uniquement du domaine du modèle (cf. sur la Figure 3, la flèche intitulée "exploration du modèle par simulation"). Elle est utile pour les trois modèles étudiés car ceux-ci impliquent de nombreux tirages de probabilités, d'où une variabilité possible des résultats obtenus par réplification d'une même simulation. Quand un modèle est stochastique, les résultats d'une unique simulation ne suffisent pas à l'analyse des outputs ; il est nécessaire d'étudier la moyenne (ou autre indicateur de valeur centrale), voire la dispersion, de la distribution statistique des résultats de n réplifications d'une même simulation. Ceci requiert de déterminer le nombre de réplifications qui permet d'obtenir une valeur moyenne (ou autre indicateur de valeur centrale) qui soit fiable. L'analyse de sensibilité consiste, elle, à explorer le comportement du modèle à travers la variation des valeurs de ses paramètres.

15 La vérification d'un modèle peut aussi être définie relativement à son implémentation informatique. « *Verification is the check for correctness of this implementation (that the model is built as intended)* » (Sun et al. 2016).

« En améliorant la connaissance sur le fonctionnement d'un modèle, l'analyse de sensibilité permet de :

- simplifier le modèle : en étudiant l'impact des différents composants du modèle, elle permet de classer et quantifier l'importance relative de chacun dans la simulation d'un processus, et d'alléger si besoin la structure du modèle (Cariboni et al. 2007 ; Ngo & See 2012) ;
- aider au calibrage, par l'exploration des espaces de valeurs atteints selon les valeurs de paramètres testées (Crosetto et al. 2000 ; Richiardi et al. 2006 ; Barros 2012) ;
- déterminer les amplitudes de variations et des intervalles de confiance des valeurs de résultats selon les amplitudes de variation des valeurs de paramètres (Monod et al. 2006 ; Schouten et al. 2014) ;
- identifier les zones de transition dans les résultats selon les variations des valeurs de paramètres : les modèles complexes avec des dynamiques non-linéaires peuvent connaître subitement des zones de transition abruptes très localisées correspondant à des combinaisons des valeurs de paramètres précises. Ces changements radicaux ne peuvent être mis en avant que par une exploration approfondie du comportement du modèle, à travers l'ensemble des variations possibles des valeurs de paramètres (Cariboni et al. 2007 ; Schouten et al. 2014) » (Hirtzel 2015).

L'analyse de sensibilité est utile pour le paramétrage d'un modèle. En effet, un même mécanisme peut induire une tendance à la dispersion des implantations humaines simulées pour certaines valeurs de paramètres et une tendance à la concentration pour d'autres valeurs. Il se peut aussi que la valeur d'un paramètre ait l'effet escompté uniquement quand la valeur d'un autre paramètre est comprise dans un certain intervalle. Si la modification des valeurs de paramètres implique de trop grandes ou de trop petites variations des résultats de simulation, il faut alors étudier en détail les mécanismes du modèle : soit certains mécanismes doivent être formalisés autrement, soit les effets de plusieurs mécanismes, représentés de manière satisfaisante dans le modèle, se compensent ou se renforcent. Pour les modèles comportant de nombreux mécanismes, les phénomènes de compensation entre eux sont fréquents.

« (...) the complexity of model behaviour may decrease after model complicatedness¹⁶ crosses a certain threshold. Reasons for such a negative relationship are possibly that the effect of too many entities cancels each other out, or that complex behaviour is blurred by many additive effects. In such cases, model behaviours tend to be less dynamic or even converge to equilibriums or regular patterns » (Sun et al. 2016).

Néanmoins, dans le cas de modèles tels que MobiSim-MR et SimFeodal qui visent un certain réalisme, on ne veut pas les simplifier en supprimant certains mécanismes, quand bien même leurs effets soient redondants avec les effets d'autres mécanismes aux niveaux méso- ou macro-géographiques, à condition que chaque mécanisme soit connu dans le domaine empirique (et reconnu dans le domaine conceptuel). En effet, les valeurs des variables de mécanisme sont intéressantes à étudier dans le but de comprendre les déterminants des dynamiques spatiales simulées. On peut aussi imaginer que certains mécanismes aient des effets redondants quand le modèle est appliqué à une certaine zone d'étude (i.e. dans certains cas spécifiques) mais non quand il est appliqué à une autre zone d'étude.

¹⁶ « By describing a model as complicated, we mean the model structure contains large numbers of variables or agents and, more importantly, detailed representation of processes and interactions via logical rules and/or quantitative relationships (i.e. equations) » (Sun et al. 2016).

En pratique, la vérification d'un modèle après son élaboration est souvent négligée, dû au manque de temps et de moyens techniques (Deffuant, Amblard, Dubos, Ramat 2003), alors même qu'en connaître le fonctionnement peut être une fin en soi (Amblard, Rouchier, Bommel 2006 ; Amblard, Bommel, Rouchier 2007). A l'heure actuelle, parmi les trois modèles étudiés, seul MobiSim-MR a fait l'objet d'analyses de stabilité et de sensibilité, dans le cadre de la thèse de J. Hirtzel (2015).

Paramétrage, évaluation et validation de MobiSim-DR

Le modèle MobiSim-DR est très simple. Il ne comporte qu'un seul mécanisme qui consiste en la distribution spatiale de la croissance résidentielle. Celle-ci est issue de la combinaison de deux distributions de fréquences : la part des logements construits dans chaque classe de taille de commune (ou de tache urbaine) et la répartition des logements dans chaque classe entre maisons individuelles et appartements en immeuble collectif. Aucun calibrage n'est requis pour définir les paramètres de la distribution spatiale de la croissance résidentielle car ils représentent directement les objectifs fixés pour le développement résidentiel simulé.

La validation empirique du modèle MobiSim-DR a consisté en un contrôle visuel du réalisme des développements résidentiels simulés (Figures 10 et 11 pages suivantes), ainsi que la comparaison ponctuelle des résultats de simulation avec des données empiriques de niveau micro-géographique dans un quartier de Besançon, où le développement résidentiel s'est produit de manière récente (Figure 12).

Figure 12. Comparaison des développements résidentiels simulés avec MobiSim-DR (pour un scénario de périurbanisation régulée) avec le développement résidentiel réel observé entre 2010 et 2012. Quartier des Hauts du Chazal, Besançon (Doubs). Source : (Bourgeois 2015).

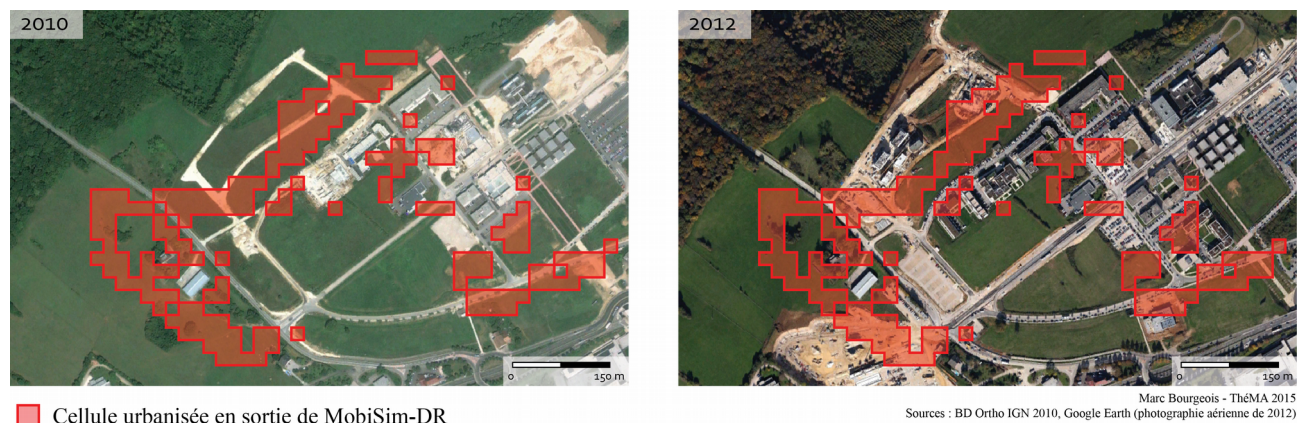


Figure 10. Deux exemples de développements résidentiels simulés avec MobiSim-DR pour l'aire urbaine de Besançon. Source : (Tannier, Bourgeois, Frémond 2017).

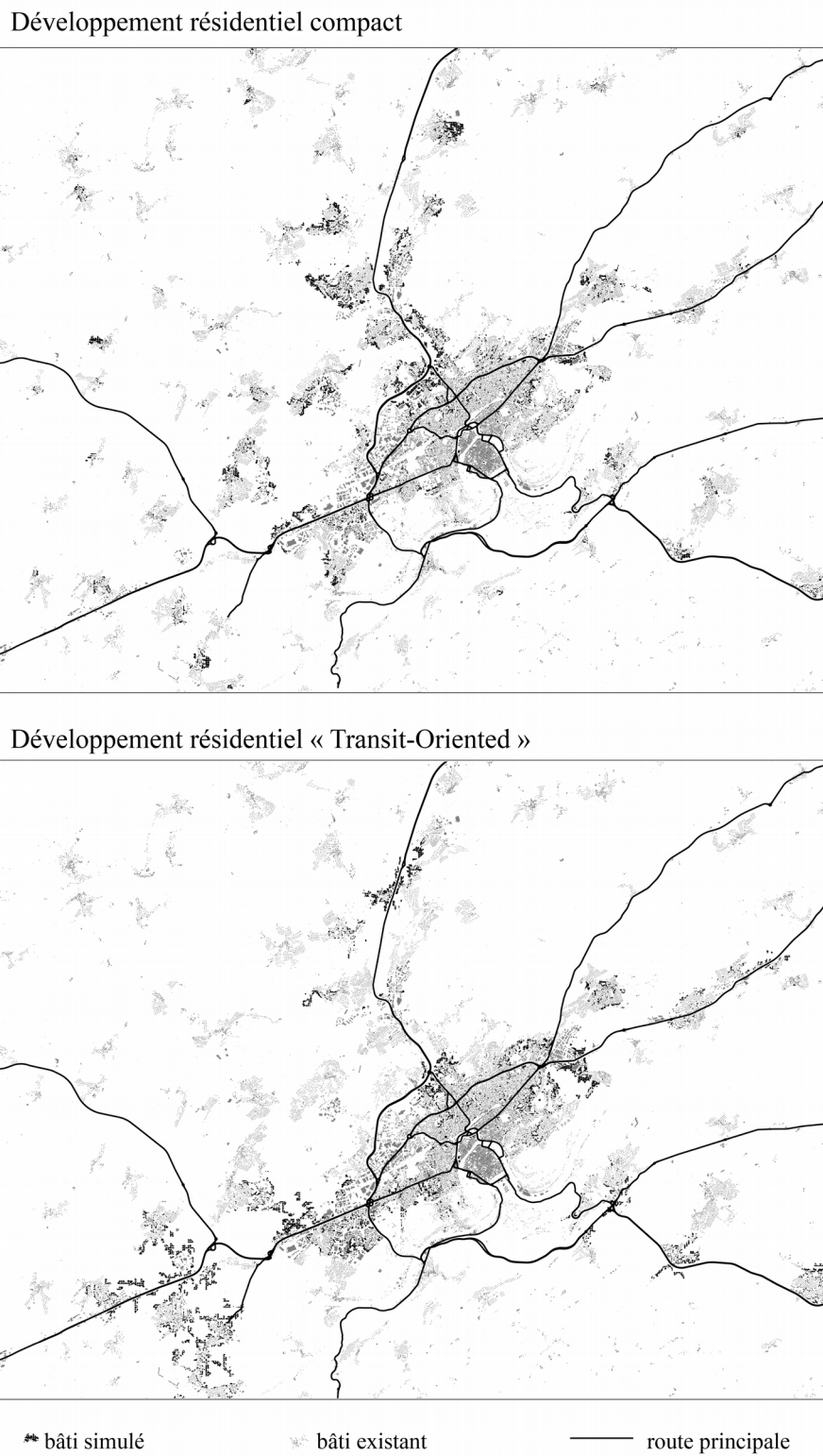
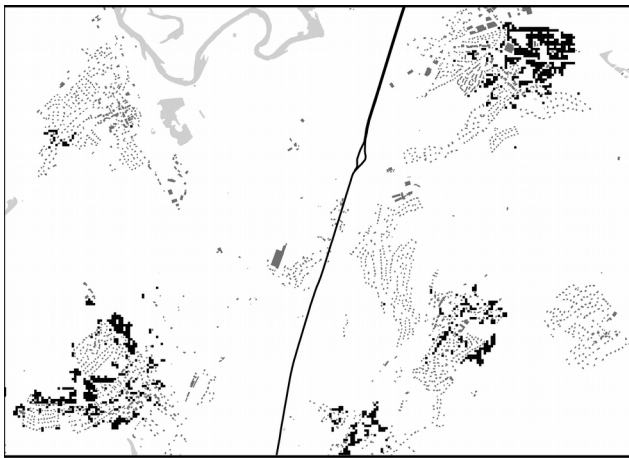
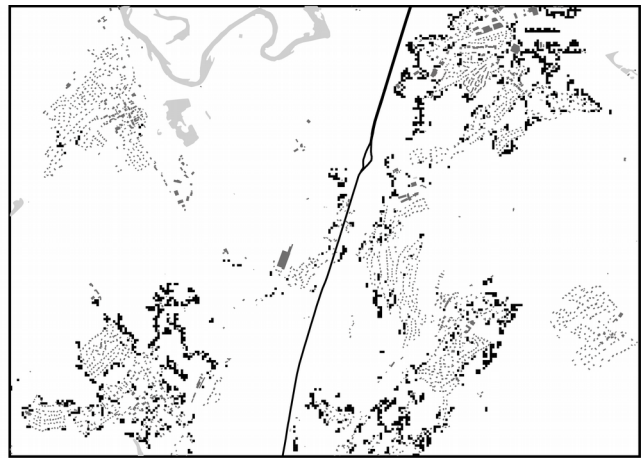


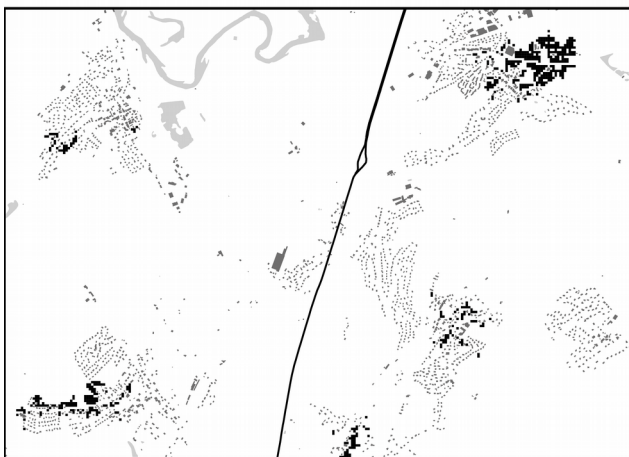
Figure 11. Formes locales des développements résidentiels simulés avec MobiSim-DR pour l'aire urbaine de Besançon (zoom sur quelques communes du secteur nord de l'agglomération). Source : (Tannier, Bourgeois, Frémond 2017).



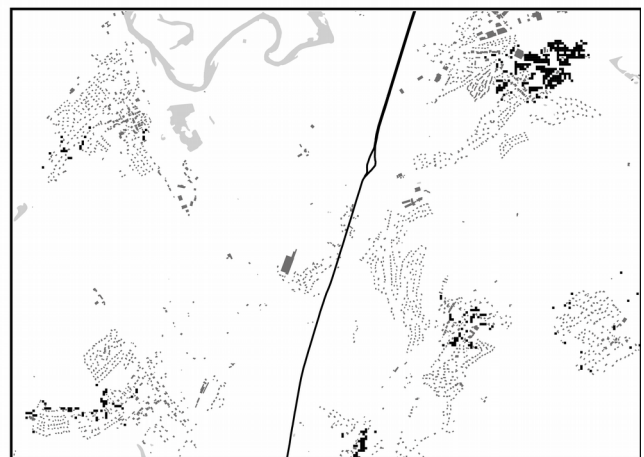
S1 - Développement résidentiel compact



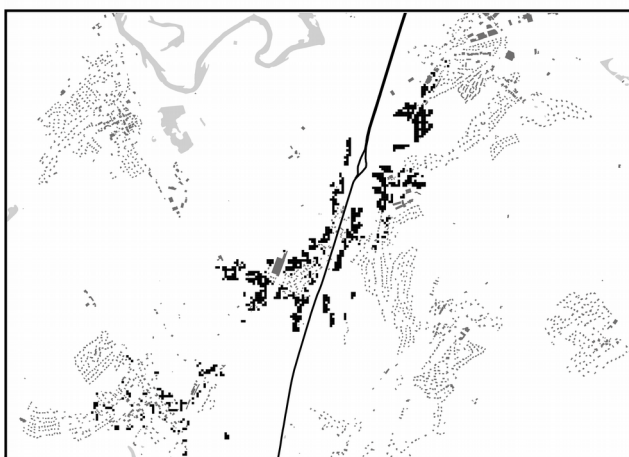
S2 - Développement résidentiel modérément compact







S3 - Développement contrôlé des zones périurbaines



S4 - Etalement urbain



S5 - Développement résidentiel « Transit Oriented »

-  bâti simulé
-  bâti existant
-  route principale
-  cours d'eau

Paramétrage, évaluation et validation de MobiSim-MR

Le paramétrage du modèle MobiSim-MR a été effectué dans le cadre de la thèse de J. Hirtzel (2015). Contrairement à de nombreux modèles portant sur le même thème, aucune valeur de variable ni de paramètre n'a été obtenue au moyen d'une estimation statistique de préférences révélées ou déclarées des ménages. Pour de nombreuses variables, le paramétrage a consisté en la transcription, sous forme quantitative, de résultats d'enquête exposés dans l'abondante littérature existant sur le thème du choix et des préférences résidentielles des ménages (Tableau 10). Ce paramétrage est général, valable pour toutes les villes françaises de 100 000 à 1 000 000 d'habitants. Des mises à jour des valeurs de paramètres sont possibles via une veille bibliographique et/ou l'intégration des résultats de nouvelles enquêtes.

Tableau 10. Paramétrage du modèle MobiSim-MR

Groupes de paramètres	Ordre de grandeur	Paramétrage
Appréciations du logement	Connu	Valeurs quantitatives discrètes fixées à partir de l'étude de la littérature
Appréciations de l'environnement résidentiel local	Connu	Fonctions continues fixées à partir de l'étude de la littérature
Appréciations de l'environnement résidentiel global	Inconnu	Étude de la distribution statistique des accessibilités à l'emploi et coûts d'accès au centre-ville obtenus via la simulation des mobilités quotidiennes avec MobiSim pour la situation initiale
Importances de chaque caractéristique du logement et de l'environnement résidentiel pour chaque catégorie de ménages (localisation résidentielle actuelle et autres localisations possibles)	Connu	Modalités qualitatives fixées à partir de l'étude de la littérature
Mobilité individuelle	Inconnu	Analyses statistiques des données INSEE MIGCOM 2008
Intérêt global à migrer	Inconnu	Étude de la distribution des valeurs d'attractivité des logements vacants obtenues par simulation pour la situation initiale
Nombre de logements connus	Connu	Évaluation subjective à partir de l'étude de la littérature

Le tableau 10 montre que trois groupes de paramètres n'ont pas d'ordre de grandeur connu quand bien même ils représentent un phénomène connu empiriquement (et reconnu conceptuellement). Parmi eux, la mobilité individuelle dépend de la satisfaction d'un ménage vis-à-vis de sa localisation résidentielle actuelle. Elle est représentée dans le modèle par une fonction logistique, de valeurs comprises entre 0 et 1. La forme de la fonction est déterminée par deux paramètres α et β qui varient selon les caractéristiques socio-économiques des ménages. À (in)satisfaction résidentielle équivalente, deux types de ménages différents n'auront pas les mêmes dispositions pour envisager un déménagement. Le paramètre α de la fonction logistique correspond à la valeur de satisfaction pour laquelle la mobilité individuelle est égale à 0,5. Plus α est élevé, plus le ménage sera mobile, c'est-à-dire prêt à déménager quand bien même sa valeur de satisfaction est élevée. Le paramètre β détermine, lui, l'étalement de la fonction logistique. Thématiquement cette inclinaison peut se traduire en termes de réactivité des ménages face aux variations de satisfaction : si la pente est forte

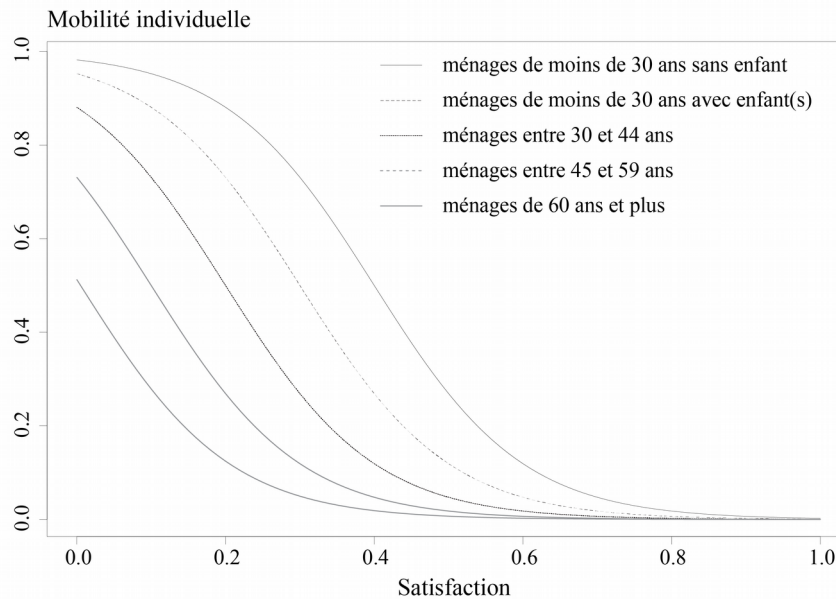
(β élevé), la mobilité individuelle change de façon importante pour des valeurs de satisfaction légèrement différentes aux alentours de 0,5 ; si la pente de la courbe logistique est douce (β faible), cela traduit un changement de la mobilité individuelle des ménages plus progressif vis-à-vis des variations de satisfaction. Afin de rendre compte de l'hétérogénéité des comportements, il aurait été opportun d'assigner un couple de valeurs α et β à chaque type de ménage. Néanmoins, en raison du grand nombre de types de ménages possibles dans MobiSim-MR, il était souhaitable d'éviter un sur-paramétrage et nous avons regroupé les types de ménages en quelques grandes classes seulement. Pour cela, nous avons tout d'abord cherché à identifier la ou les caractéristique(s) des ménages les plus aptes à distinguer des comportements différents en ce qui concerne les taux annuels de migration. Après plusieurs explorations des données INSEE MIGCOM 2008, il se trouve que les critères qui discriminent le plus les comportements de mobilités résidentielles intra-urbaines entre les ménages sont l'âge de la personne de référence et la présence ou non d'enfant(s). Selon ces résultats, nous avons établi une typologie des ménages en cinq classes (Tableau 11). Les ménages de moins de 30 ans, déclinés en deux classes selon la présence ou non d'enfant(s), sont les plus mobiles. Les trois autres catégories dépendent strictement de l'âge et leur mobilité diminue à mesure que celui-ci augmente. Nous avons choisi de fixer une valeur de β identique, égal à -10, pour les cinq classes de ménages. Pour choisir les valeurs α , nous sommes partis du principe que les ménages qui déménagent le plus dans la réalité (fréquences observées) sont ceux qui déménagent le plus facilement. Ces derniers auront donc une mobilité individuelle plus importante et une valeur de α plus élevée. Pour choisir les valeurs α pour chacune des classes, l'objectif visé était d'obtenir des parts de migrants par classe qui correspondent à celles identifiées avec les données MIGCOM pendant les premières années de simulation, puis de maintenir le classement relatif de ces cinq classes de ménages entre elles au cours des années simulées suivantes.

Dans l'idée de souligner l'hétérogénéité entre les comportements des ménages, le jeu de valeurs de α que nous avons initialement choisi présentait une forte amplitude entre les différentes classes (Tableau 11). Néanmoins, les taux annuels de migration simulés par MobiSim-MR avec ces valeurs étaient beaucoup trop élevés (aux alentours de 28%) pour être réalistes, aussi avons-nous réévalué les valeurs de α de chaque classe (Tableau 11). La figure 13 présente graphiquement les fonctions logistiques résultantes. On peut constater que, hormis la classe des ménages de moins de moins de 30 ans avec enfant(s), les autres classes ne bénéficient pas d'une mobilité individuelle maximale (égale à 1). Les ménages de plus de 60 ans ont une mobilité individuelle, en cas de totale insatisfaction résidentielle, égale à 0,5 au maximum.

Tableau 11. Paramétrage de la mobilité individuelle des ménages.

Type de ménage	Part de migrants par classe de ménages (MIGCOM 2008)	Classe	α initial	α final
Moins de 30 ans avec enfant(s)	16,83 %	1	0,85	0,40
Moins de 30 ans sans enfant	14,28 %	2	0,65	0,30
30 à 44 ans	10,03 %	3	0,50	0,20
45 à 59 ans	4,22 %	4	0,35	0,10
Plus de 60 ans	2,08 %	5	0,30	0,05

Figure 13. Fonctions déterminant la mobilité individuelle des cinq classes de ménages. Source : (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016).



Pour les autres variables et paramètres de mécanisme dont on ne connaît pas l'ordre de grandeur, à savoir l'intérêt global à migrer des ménages, les coûts d'accès au centre-ville et les accessibilités générales à l'emploi, il n'existe pas de données empiriques les décrivant et leur quantification a été effectuée via l'étude de distributions statistiques de résultats de simulation (Tableau 10). Sur la figure 14, on observe que les distributions de fréquence de coûts d'accès au centre-ville et d'accessibilités généralisées aux zones d'emplois en début de période de simulation présentent un premier seuil au niveau du premier quartile. Elles présentent un deuxième seuil, qui se situe entre la médiane et le troisième quartile pour les distributions de coût d'accès au centre-ville et au niveau du troisième quartile pour les distributions d'accessibilité générale à l'emploi. Ces deux seuils ont permis de définir les fonctions d'appréciation des ménages correspondant à chaque variable. Pour ce qui est de l'intérêt global à migrer, le calcul de cette variable intègre en paramètre l'attractivité globale des logements de l'agglomération. Afin de définir la valeur de ce paramètre, nous avons étudié la distribution de l'attractivité de tous les logements (vacants ou non) pour tous les ménages lors de la première année de simulation, et choisi de retenir la valeur médiane de cette distribution (égale à 0,12).

Toutes les opérations de paramétrage exposées ci-avant ont été effectuées en préalable de l'évaluation et de la validation empirique du modèle MobiSim-MR, excepté dans le cas de la mobilité individuelle des ménages, pour laquelle le paramètre α de la fonction logistique a été revu à la baisse au regard du taux annuel de migration simulé, trop élevé par rapport au taux attendu. De fait, le premier objectif des simulations avec MobiSim-MR consiste à simuler un taux annuel de migration des ménages proche de celui de la zone d'étude sur lequel le modèle est appliqué, à savoir 13,7 % pour l'agglomération de Besançon en 2005 (Source : Programme local de l'habitat 2005, Communauté d'agglomération du Grand Besançon). Sont compris dans le calcul de ce taux tous les changements de logement effectués dans l'agglomération, quels que soient le lieu de départ et d'arrivée. La figure 15 montre que, pour un scénario de prolongement des tendances actuelles sur vingt ans, les taux annuels de migration simulés sont un peu plus élevés que celui observé en 2005, en particulier en début de période de simulation. Ils diminuent ensuite puis se stabilisent aux alentours de 15 % à partir de l'année simulée 2020.

Figure 14. Distributions de fréquence des coûts d'accès au centre-ville et d'accessibilités généralisées aux zones d'emplois en début de période de simulation. Adapté de (Hirtzel 2015).

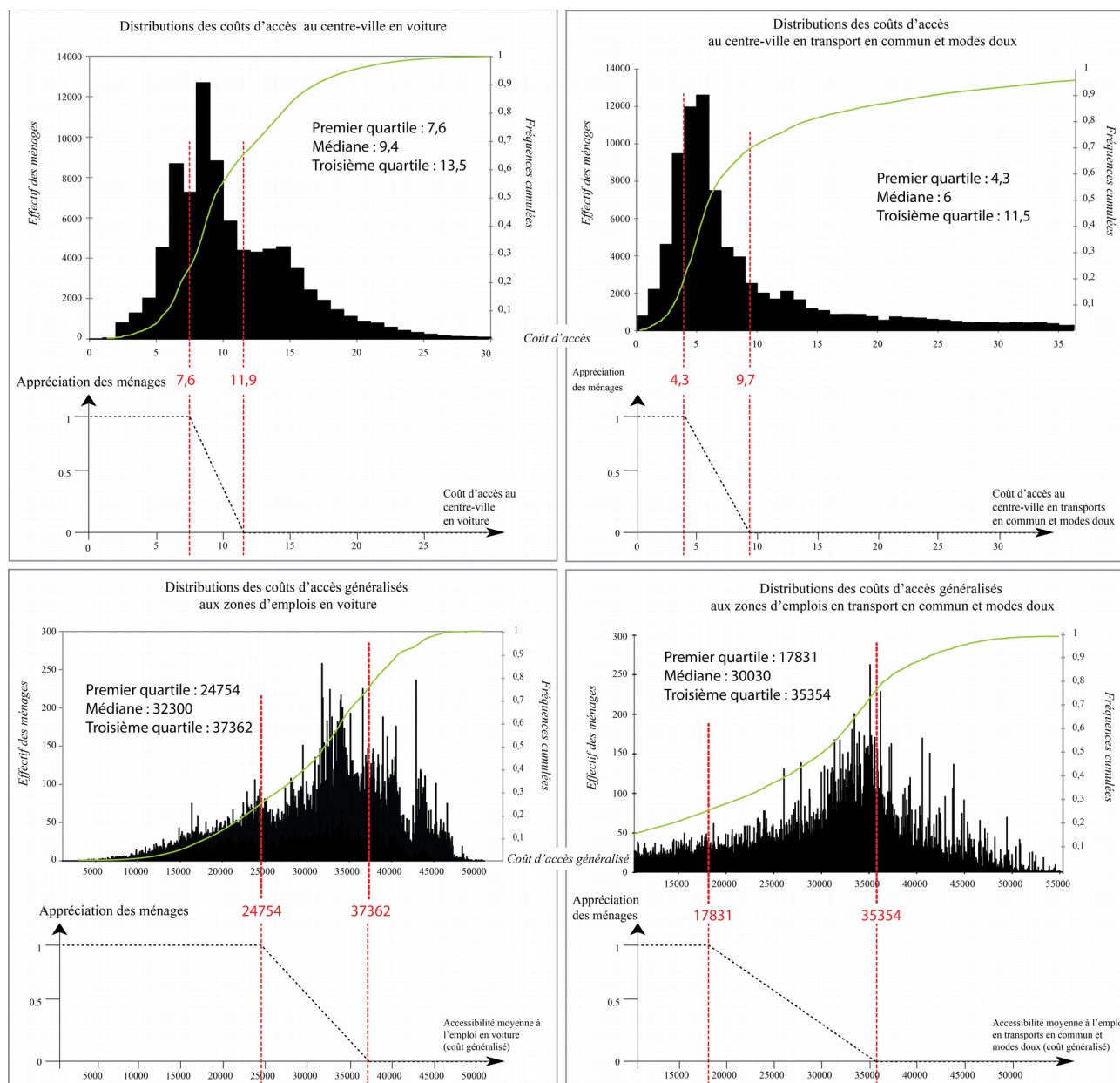
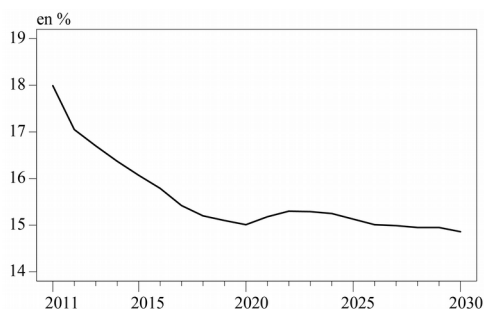


Figure 15. Taux de migration annuel des ménages dans l'agglomération bisontine simulé avec MobiSim-MR pour un scénario de prolongement des tendances actuelles. Source : (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016).



En l'absence de données statistiques en France à l'échelle de l'individu ou du ménage, l'évaluation et la validation empirique du modèle MobiSim-MR se font forcément à un niveau agrégé (l'ensemble de l'agglomération, les communes ou quartiers, ou encore les types de ménages). Les analyses ont été effectuées pour un scénario de prolongement des tendances actuelles sur vingt ans (tendances démographiques, coûts de transport actuels, préférences et styles de vie des ménages actuellement observés, reproduction des tendances passées pour la construction de logements ; voir la section 5 de l'article (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016)). La cohérence des résultats de simulation a été évaluée essentiellement dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle aux modifications de valeurs de ses paramètres qui sera présentée ci-après. La validation empirique du modèle a consisté en un contrôle des variables et des paramètres de mécanisme par des praticiens de l'aménagement en charge de la politique de logement (au sein du service Urbanisme de l'agglomération de Besançon) et en charge des projets d'agglomération (au sein du service Prospective de la Communauté d'agglomération du Grand Besançon). Ce contrôle a induit la modification de certains mécanismes impliqués dans le calcul des coûts des logements. Le réalisme des résultats de simulation (flux migratoires urbain-périurbain, comportements migratoires des différents types de ménages, évolutions de la population par commune...) a été validé en travaillant avec les praticiens de l'aménagement pré-cités (voir la section 6 de l'article (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016)).

L'analyse de stabilité des résultats de simulation de MobiSim-MR a été réalisée pour 100 répliquions de la simulation du scénario de prolongement des tendances actuelles (Tableau 12). La moitié des coefficients de variation autour de la moyenne sont inférieurs à 1 % et les trois quarts sont inférieurs à 3 %, même après 20 années de simulation. Ceci montre la très grande stabilité des résultats de MobiSim-MR, quand bien même les résultats finaux présentent une variabilité plus forte que les résultats intermédiaires (valeurs simulées des variables de mécanisme). Un seul résultat montre une plus grande variabilité entre les simulations en 2030 : la médiane du nombre de logements attractifs pour chaque ménage, qui présente un coefficient de variations de 12,1 %. Cette valeur, si elle se démarque nettement des autres, reste néanmoins suffisamment faible pour considérer que la variable est stable également. Qui plus est, sa moindre stabilité n'influence pas ou très peu la stabilité des résultats finaux.

Tableau 12. Variables étudiées dans l'analyse de stabilité du modèle MobiSim-MR et coefficients de variation pour 100 répliquions d'une même simulation. Les coefficients de variation supérieurs à 2 % sont en gras. Source : (Hirtzel 2015).

Variable étudiée		Coefficient de variation (en %)	
		en 2012	en 2030
Appréciations de l'environnement résidentiel global	3 ^{ème} quartile des accessibilités au centre-ville (CV) en voiture	0,04	0,85
	3 ^{ème} quartile des accessibilités aux zones d'emplois en voiture	0,06	1,71
	3 ^{ème} quartile des accessibilités au centre-ville en transports en commun	0,00	0,41
	3 ^{ème} quartile des accessibilités aux zones d'emplois en transports en communs (TC)	0,00	0,39
Coût des logements	3 ^{ème} quartile des revenus des ménages	0,18	0,42
	Nombre de logements à coût faible	0,54	0,71

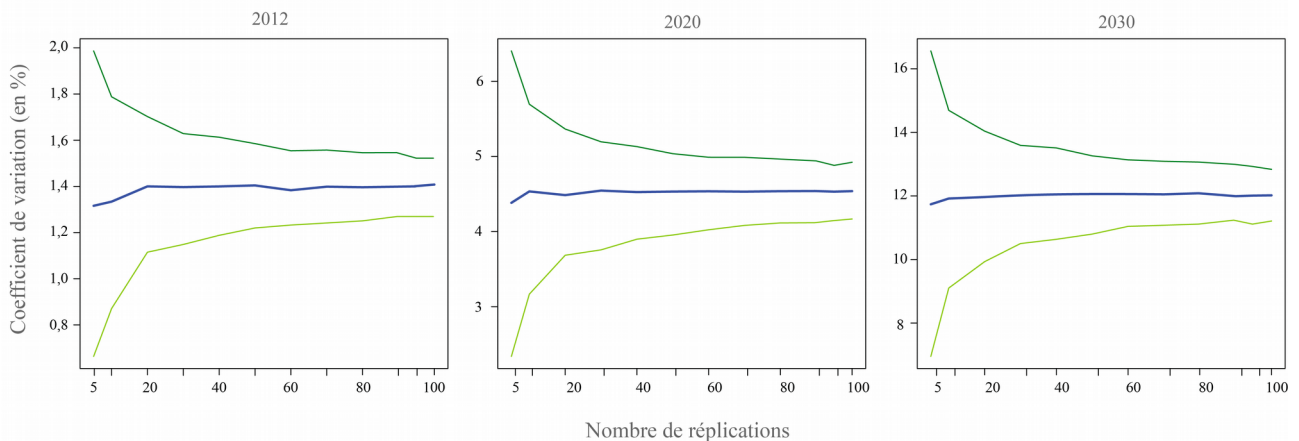
	Nombre de logements à coût moyen	0,19	0,21
	Nombre de logements à coût élevé	0,17	0,23
Satisfaction et intérêt résidentiels	Médiane des valeurs des satisfaction	0,05	0,53
	Médiane des valeurs d'intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle	0,11	0,32
Intérêt global à déménager	Médiane des valeurs d'attractivité des n logements connus	0,82	2,43
	Médiane du nombre de logements attractifs	0,05	12,14
Mobilité résidentielle individuelle	Nombre de ménages de moins de 30 ans avec enfant(s)	0,66	4,93
	Nombre de ménages de moins de 30 ans sans enfant	0,45	1,17
	Nombre de ménages 30-44 ans	0,25	1,42
	Nombre de ménages 45-59 ans	0,14	0,39
	Nombre de ménages de plus de 60 ans	0,17	0,88
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans avec enfants	0,16	1,20
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de moins de 30 ans sans enfant	0,17	1,50
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 30-44 ans	0,13	1,24
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages 45-59 ans	0,05	1,09
	Médiane des valeurs de satisfaction des ménages de plus de 60 ans	0,07	0,87
Outputs de simulation (résultats finaux)	Nombre de migrants aux sein des communes périurbaines	2,18	5,60
	Nombre de migrants des communes périurbaines vers Besançon	1,46	6,41
	Nombre de migrants de Besançon vers les communes périurbaines	2,21	5,04
	Nombre de migrants au sein de Besançon	1,20	2,48
	Nombre de ménages préférant la voiture	0,19	0,73
	Nombre de ménages préférant les TC	0,16	0,40
	Nombre total de déménagements	0,59	1,88

L'étude des coefficients de variation pour des nombres croissants de réplifications montre que le gain de stabilité résultant de l'augmentation du nombre de réplifications devient faible à partir de 30 réplifications et anecdotique au-delà de 50 (Figure 16). Le seuil de stabilité du modèle pourrait donc être fixé aux alentours de 30 réplifications. Cependant, répliquer 30 fois une simulation avec MobiSim nécessite un temps de calcul important (25 h sur deux ordinateurs d'un mésocentre de calcul, l'un possédant 12 cœurs et l'autre, 16 cœurs). Sur la figure 16, on peut voir qu'en 2012, les coefficients de variation du nombre annuel de déménagements varient entre 0,4 et 1 % pour cinq

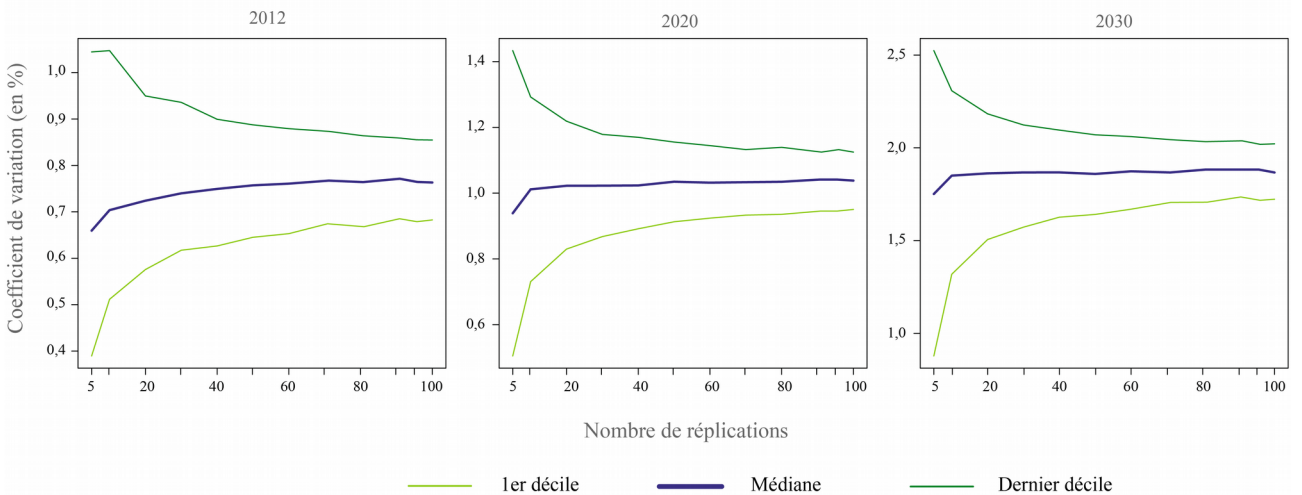
réplications de la même simulation, et entre 0,9 et 2 % en 2030¹⁷. Concernant le nombre de logements attractifs (Figure 16), l'amplitude de variation entre cinq réplications est un peu plus grande en 2030, entre 8 et 16 % de variation selon les simulations, mais elle reste mesurée. Ainsi, on peut considérer que la moyenne de dix réplications seulement d'une même simulation permet d'obtenir des résultats fiables de simulation des mobilités résidentielles à une échelle méso- ou macro-géographique.

Figure 16. Étude de la stabilité des résultats de simulation (nombre de déménagements et nombre de logements vacants attractifs) pour un nombre croissant de réplications de la même simulation. Source : (Hirtzel 2015).

Nombre de logements vacants attractifs



Nombre de déménagements



Comme annoncé précédemment, MobiSim-MR a également fait l'objet d'une analyse de la sensibilité des résultats de simulation à des modifications de valeurs des paramètres. L'étude de la sensibilité globale d'un modèle consiste à explorer le plus grand espace possible de résultats de simulation en faisant varier systématiquement les valeurs des paramètres (Hamby 1994). Pour ce faire, différentes combinaisons des valeurs de paramètres sont testées, de manière exhaustive ou par échantillonnage. L'objectif est notamment d'identifier d'éventuels résultats particuliers, obtenus

17 Chaque ensemble de n de réplications (représentés sur l'axe des abscisses) résulte de 1000 tirages aléatoires avec remise de n réplications parmi les 100 simulations effectuées pour l'analyse de stabilité.

uniquement pour une certaine combinaison de valeurs de paramètres (Schmitt, Rey-Coyrehourcq, Reuillon, Pumain 2015 ; Schouten, Verwaart, Heijman 2014). La plupart des auteurs valorisent l'étude de la sensibilité globale des modèles puisqu'elle permet une analyse complète de leurs comportements et la mesure quantitative de l'importance relative de chaque paramètre sur les résultats de simulation (Saltelli, Chan, Scott 2000 ; Monod, Naud, Makowski 2006; Richiardi, Leombruni, Saam, Sonnessa 2006). Cependant, dans le cas de MobiSim-MR, étant donné le nombre de paramètres, il faudrait tester un très grand nombre de combinaisons de valeurs pour mener une analyse de sensibilité globale. L'expérience en serait très coûteuse en temps de calcul. De plus, l'automatisation des tâches de traitement des résultats de simulation n'est pas possible car toutes diffèrent en fonction des paramètres et des variables concernés. C'est pourquoi seule une analyse locale de sensibilité a été effectuée. La méthode choisie pour ce faire, intitulée "one-at-a-time" (OAT), consiste à modifier les valeurs de chacun des paramètres les uns après les autres, toutes choses égales par ailleurs, c'est-à-dire tous les autres paramètres étant fixés à leur valeur par défaut. Ceci permet d'étudier l'impact direct de chacun des paramètres sur quelques variables résultantes mais non d'étudier l'effet de combinaisons de changements de valeurs de paramètres.

« L'analyse de la sensibilité locale est utile en amont d'une analyse plus globale (Hamby, 1994; Monod et al., 2006), puisqu'elle permet de dresser un « profil de réponses » du modèle, en ciblant des points de paramètres bien spécifiques. Par sa simplicité d'exécution, ce profil peut être dressé pour chaque étape de la simulation, permettant ainsi une évaluation continue d'une sensibilité des résultats de simulation imputable à chaque paramètre. Ces qualités se révèlent utiles pour la configuration d'une analyse plus globale. Ainsi, si l'analyse globale paraît incontestablement la plus performante pour étudier rigoureusement la sensibilité d'un modèle, et plus particulièrement d'un modèle aux dynamiques non-linéaires, certains auteurs soulignent néanmoins la complémentarité des deux approches (Ginot et Monod, 2007), l'analyse locale permettant de préparer le protocole de l'analyse globale » (Hirtzel 2015).

L'analyse de sensibilité de MobiSim-MR a porté sur sept groupes de paramètres, choisis selon leur rôle dans le modèle et leur impact supposé sur les résultats de simulation. Pour les paramètres ne nécessitant pas de calibrage, l'objectif était simplement de tester leur impact sur les valeurs des variables de mécanismes qu'ils permettent de calculer. Sont concernés les paramètres d'appréciations du logement et de l'environnement résidentiel, les échelles de valeurs des importances, et les paramètres entrant dans le calcul de la variable "coût du logement". Pour les autres paramètres, à savoir l'attractivité globale de tous les logements, le nombre de logements connus par chaque ménage et la mobilité individuelle, l'objectif était de préparer leur calibrage éventuel.

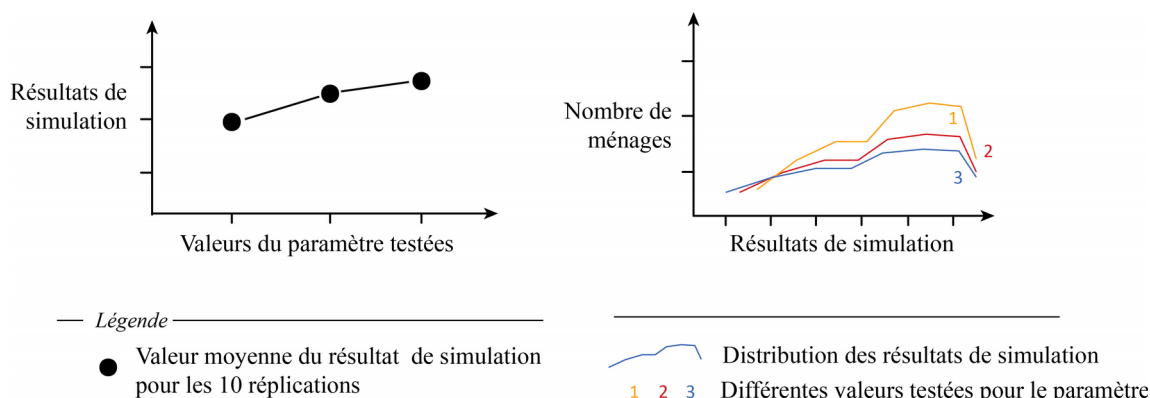
Les valeurs de paramètres testées dans l'analyse de sensibilité ont été choisies différemment pour chacun d'eux, suivant une volonté de parcimonie de traitements afin de réduire au maximum les temps de calcul nécessaires. Ce faisant, le nombre de valeurs testées n'est pas le même pour chaque paramètre (entre 2 et 8 valeurs) et l'écart entre les valeurs des paramètres n'est pas nécessairement régulier. Suivant la même logique, les variables observées dans l'analyse de sensibilité diffèrent pour chaque paramètre (Tableau 13). Pour certaines variables (satisfaction résidentielle moyenne, taux annuel de migration, nombre de logements dans chaque classe de coût et nombre de migrants selon le sens de migration), les résultats de l'analyse de sensibilité se présentent sous la forme de quelques valeurs synthétiques : pour chaque valeur de paramètre testée, seule la valeur moyenne des dix répliquations de la simulation testée est représentée (Figure 17). Pour les autres variables, les résultats se présentent sous la forme d'une distribution discrétisée en 1000 classes, la valeur moyenne des dix répliquations étant calculée pour chaque classe.

Tableau 13. Variables étudiées pour chaque paramètre testé dans l'analyse de sensibilité de MobiSim-MR. D'après (Hirtzel 2015).

Paramètres ou groupes de paramètres	Variables étudiées			
	Variables de mécanismes	Variables de sortie (outputs)		
		Satisfaction résidentielle moyenne	Taux de migration annuel	Flux migratoires
Appréciations du logement actuel	<i>Satisfaction vis-à-vis du logement actuel</i> <i>Satisfaction résidentielle</i>			
Appréciations d'un autre logement	<i>Intérêt maximal pour un autre logement</i> <i>Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle</i>			
Appréciations de l'environnement résidentiel actuel	<i>Satisfaction vis-à-vis de l'environnement résidentiel</i> <i>Satisfaction résidentielle</i>			
Appréciations d'un autre environnement résidentiel	<i>Intérêt maximal pour un autre environnement résidentiel</i> <i>Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle</i>			
Quantification des valeurs d'importance des attributs du logement et de leur environnement résidentiel	<i>Satisfaction résidentielle</i> <i>Intérêt maximal pour une autre localisation résidentielle</i>			
Coût du logement	<i>Nombre de logements dans chaque classe de coût</i>	×	×	
Nombre de logements connus	<i>Attractivité</i> <i>Intérêt global à migrer</i> <i>Probabilité de déménager</i>	×	×	×
Attractivité globale de tous les logements	<i>Intérêt global à migrer</i> <i>Probabilité de déménager</i>	×	×	×
Mobilité individuelle	<i>Mobilité individuelle pour les ménages de chacune des 5 classes</i> <i>Mobilité individuelle pour tous les ménages</i> <i>Probabilité de déménager pour les ménages de chacune des 5 classes</i> <i>Probabilité de déménager pour tous les ménages</i>	×	×	

Le test de la sensibilité des résultats de simulation à différentes échelles de valeurs d'importance (concernant les attributs des logements et de leur environnement résidentiel) a été menée avant celle des autres paramètres, selon un protocole différent : neuf échelles de valeurs des importances ont été successivement testées, pour une seule réplique de simulation à chaque fois. Ces tests ont montré que l'échelle choisie au moment du paramétrage initial du modèle était pertinente car elle permet un compromis entre la simulation de comportements des ménages suffisamment hétérogènes à un niveau global et le respect d'une certaine cohérence mathématique du jugement des ménages.

Figure 17. Présentation des résultats de l'analyse de sensibilité de MobiSim-MR. D'après (Hirtzel 2015).



Le test de la sensibilité de chacune des évaluations résidentielles aux modifications d'une seule valeur d'appréciation a montré que le modèle est faiblement sensible à chaque modification mais que l'effet de chaque modification est perceptible dans les résultats de simulation étudiés.

L'analyse de l'attractivité des logements vacants pour les ménages a montré que le nombre de logements vacants attractifs pour chaque ménage est en général supérieur à 1500. La médiane d'attractivité d'un tirage aléatoire de 30 logements vacants attractifs parmi l'ensemble des logements vacants attractifs de chaque ménage permet d'obtenir une représentation correcte de l'attractivité de l'ensemble de ces logements : en 2015 (année simulée), la médiane d'attractivité d'un tirage aléatoire de 30 logements vacants attractifs correspond à l'attractivité médiane de tous les logements attractifs (plus ou moins 0,05) pour 71 % des ménages (62 % en 2030) ; elle est légèrement supérieure pour 2 % des ménages ; elle est inférieure (souvent de peu et parfois de beaucoup) pour 27 % des ménages (37 % en 2030).

Figure 18. Variation de la satisfaction résidentielle moyenne des ménages résultant de la modification de quelques paramètres. Résultats obtenus pour un scénario de prolongement de tendances simulé avec MobiSim. Adapté de (Hirtzel 2015).

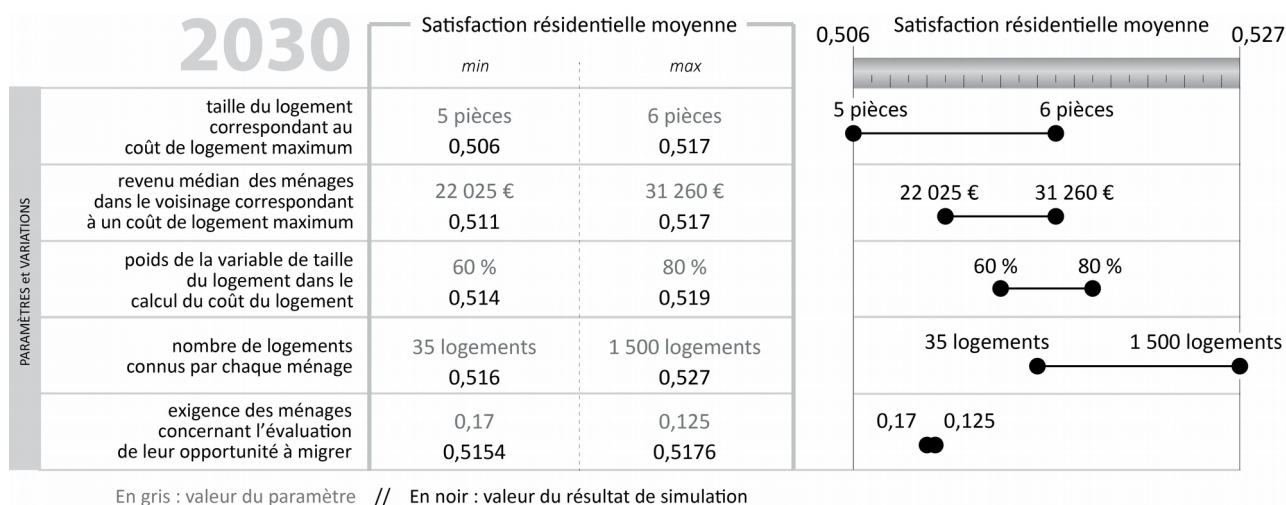
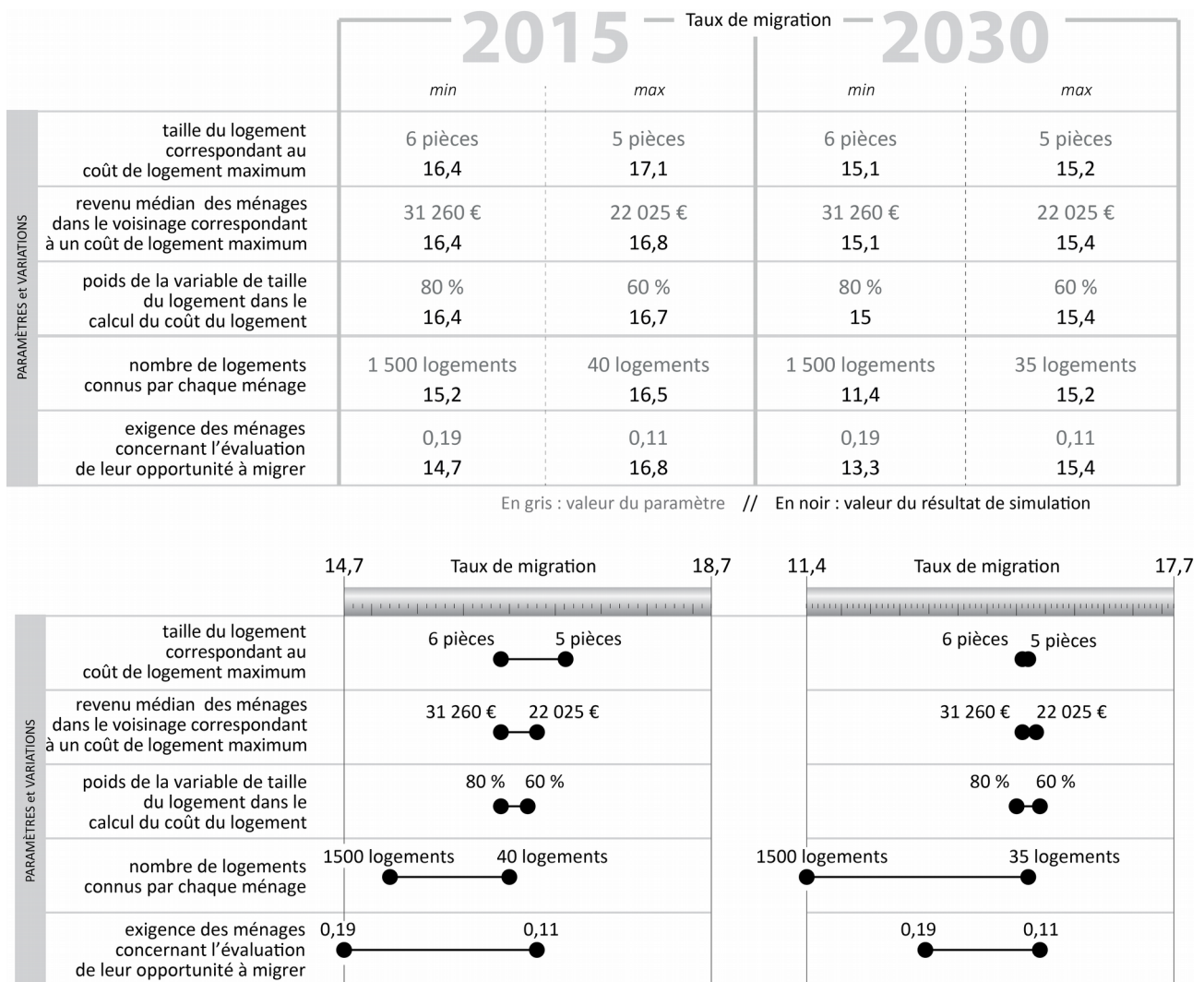


Figure 19. Variation du taux de migration des ménages résultant de la modification de quelques paramètres. Résultats obtenus pour un scénario de prolongement de tendances simulé avec MobiSim. Adapté de (Hirtzel 2015).

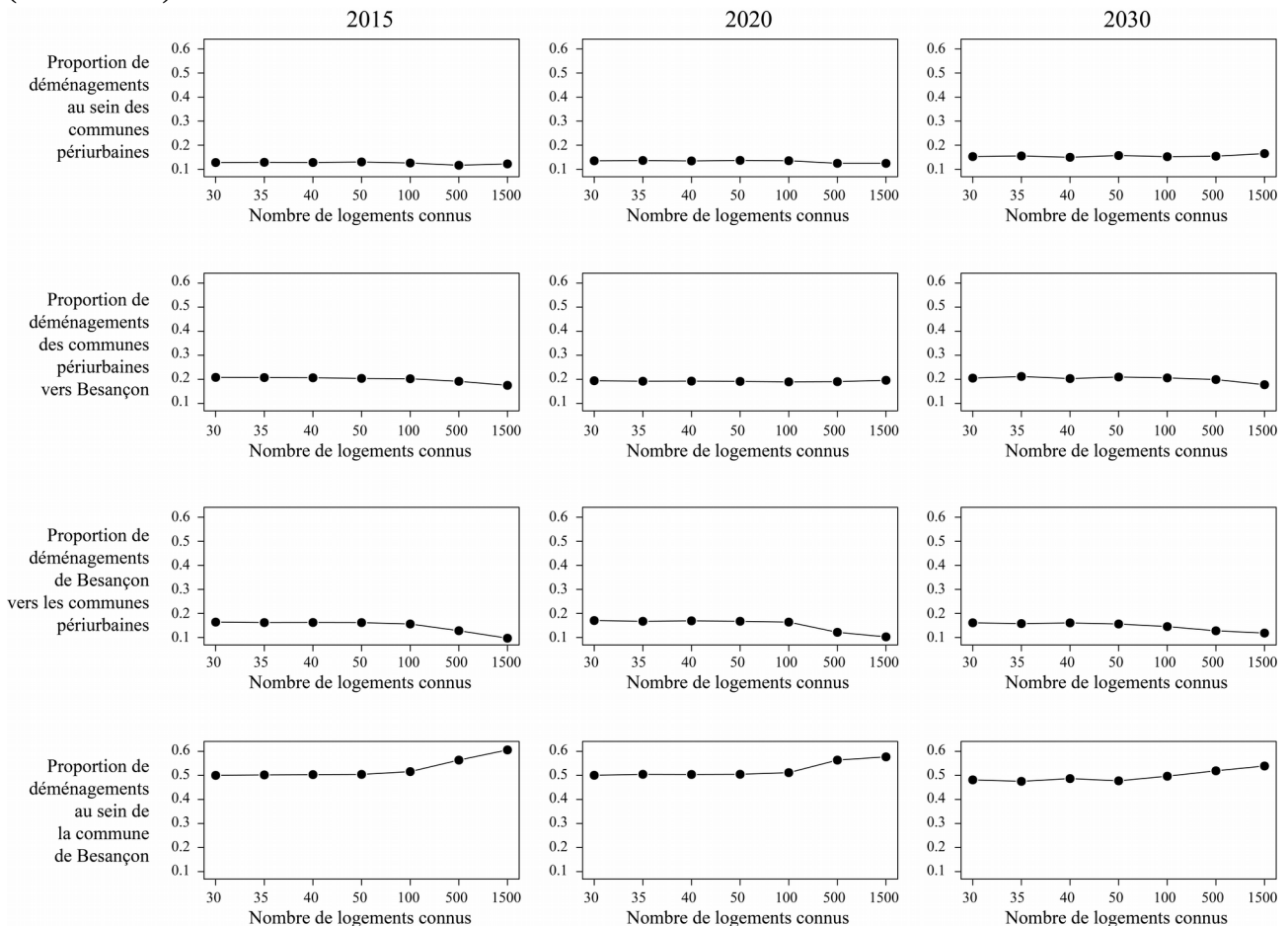


Le test de la sensibilité du modèle aux paramètres impliqués dans le calcul de l'intérêt des ménages à déménager a montré qu'en augmentant le nombre de logements connus, les ménages enrichissent leur connaissance du marché immobilier et accroissent leur intérêt à migrer. Inversement, augmenter la valeur d'attractivité globale des localisations résidentielles à partir de laquelle les ménages sont pleinement satisfaits contribue à diminuer globalement leur intérêt à migrer.

La satisfaction résidentielle moyenne des ménages varie entre 0,506 et 0,527 selon les valeurs de paramètres testées. Comme le montre la figure 18, seules certaines modifications de valeurs des paramètres ont un effet sur les valeurs de la satisfaction résidentielle moyenne. Notamment, simuler la présence de davantage de logements à coût faible et augmenter le nombre de logements connus des ménages influencent tous deux positivement la satisfaction moyenne des ménages. Concernant le taux de migration (Figure 19), les tests de sensibilité montrent qu'il est possible de diminuer le taux de migration moyen des ménages en augmentant le nombre de logements sur lequel les ménages basent leur connaissance du marché du logement et en augmentant leur niveau d'exigence quand ils évaluent leurs opportunités de déménagement.

Les tests de sensibilité ont également mis en évidence l'influence du nombre de logements connus par chaque ménage sur le nombre de ménages migrants entre la commune de Besançon et les communes périphériques de l'agglomération (Figure 20). En revanche, le nombre de ménages migrants entre la commune de Besançon et les communes périphériques ne varie pas quelle que soit la valeur du paramètre d'attractivité globale des localisations résidentielles à partir de laquelle les ménages sont pleinement satisfaits.

Figure 20. Variation du nombre de ménages migrants entre la commune de Besançon et les communes périphériques de l'agglomération en fonction du nombre de logements connus par chaque ménage. D'après (Hirtzel 2015).



Concernant l'hétérogénéité des comportements résidentiels des ménages, les résultats de l'analyse de sensibilité nous amène à supposer qu'elle résulte principalement des paramètres d'appréciations du logement et de l'environnement résidentiel. Ceci est un argument en faveur du maintien de ce grand nombre de paramètres dans le modèle qui, tous, paraissent jouer un rôle particulier dans les résultats de simulation obtenus.

Au final, l'analyse de sensibilité de MobiSim-MR a permis d'évaluer globalement la cohérence du modèle mais des analyses supplémentaires devraient être menées afin de quantifier le rôle de chaque paramètre dans la variance des résultats de simulation et de déterminer si la modification des paramètres a un impact différent selon les types de ménages. Ultérieurement, le calibrage de

Mobisim-MR devrait faire suite à son analyse de sensibilité. En particulier, le taux annuel de migration des ménages, qui paraît trop élevé, pourrait être diminué en modifiant les valeurs de trois paramètres ou groupes de paramètres de la manière suivante : augmenter le nombre de logements connus par chaque ménage, augmenter l'exigence des ménages vis-à-vis de l'attractivité des logements connus et diminuer la mobilité individuelle des ménages (5 classes). Cependant, en l'absence de connaissances empiriques permettant de déterminer le(s)quel(s) parmi ces paramètre(s) modifier et avec quelle amplitude, nous avons choisi de conserver le paramétrage du modèle en l'état. Ce faisant, le taux annuel de migration simulé pour l'agglomération bisontine suivant un scénario de prolongement des tendances actuelles est sûrement un peu trop élevé, notamment en début de simulation. Néanmoins le modèle représente bien l'hétérogénéité des comportements résidentiels des ménages et simule des comportements qui sont cohérents au regard des connaissances empiriques sur le domaine.

Paramétrage, évaluation et validation de SimFeodal

La démarche adoptée pour le paramétrage du modèle SimFeodal est différente de celle adoptée pour MobiSim-MR car les variables et paramètres n'ayant pas de valeurs connues dans le domaine empirique sont nombreux (Tableau 14).

Tableau 14. Paramétrage du modèle SimFeodal.

Paramètre	Ordre de grandeur	Valeur initiale	Valeur finale
Seigneur			
Distance maximale entre un petit seigneur et le centre d'une zone de prélèvement qu'il crée	Connu approximativement	3 000 m.	
Probabilité de création d'une zone de prélèvement de droits banaux ou de basse et moyenne justice par un petit seigneur	Inconnu	0,05	
Probabilité de créer un château en fonction de sa puissance (grand seigneur)	Inconnu	0,5 avec $puissance_seign$ requise = 5000	$1 - e^{-n \cdot puissance_seign}$ avec $n \approx 6 \times 10^{-4}$
Probabilité de créer un château en fonction de sa puissance (petit seigneur)	Inconnu	0,5 avec $puissance_seign$ requise = 2000	varie linéairement entre 0 si $puissance_seign = 0$ et 1 si $puissance_seign \geq 2000$
Probabilité qu'un château créé par un grand seigneur le soit dans un agrégat	Connu approximativement	0,5	
Probabilité pour un château possédé par un grand seigneur d'être donné en garde à un petit seigneur	Inconnu	0,5	
Pour chaque château, probabilité de création d'une zone de prélèvement de droits de haute justice (grand seigneur)	Connu approximativement	Avant 980 : 10% Après 980 : 100%	
Probabilité pour qu'une zone de prélèvement de droits banaux ou de basse et moyenne justice soit associée à la création d'un château	Inconnu	0,1	

Paroisse			
Pour les paroisses localisées en-dehors d'un agrégat, nombre minimum de foyers paysans insatisfaits dans l'aire de desserte de l'église paroissiale requis pour créer une nouvelle paroisse	Inconnu	5	20
Pour les paroisses localisées dans un agrégat, nombre minimum de foyers paysans dans l'agrégat requis pour créer une nouvelle paroisse	Connu approximativement	400	300
Foyer paysan			
Paramètres d'appréciation du montant des redevances seigneuriales acquittées	Inconnu	15	
Paramètres d'appréciation de la distance à l'église paroissiale la plus proche	Plutôt bien connu	Avant 950 : $distance_{min} = 5 \text{ km}$ et $distance_{max} = 25 \text{ km}$ De 950 à 1050 : $distance_{min} = 3 \text{ km}$ et $distance_{max} = 10 \text{ km}$ Après 1050 : $distance_{min} = 1,5 \text{ km}$ et $distance_{max} = 5 \text{ km}$	
Paramètres d'appréciation de la distance au château le plus proche	Plutôt bien connu	$dist_{min} = 1,5 \text{ km}$ $dist_{max} = 5 \text{ km}$	
Distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local	Inconnu	7000 m.	2500 m entre 800 et 880 4000 m entre 900 et 980 6000 m à partir de 1000
Intensité du besoin de protection	Plutôt bien connu	Avant 960 : 0 De 960 à 1020 : 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 A partir de 1040 : 1	
Château			
Probabilité qu'un château isolé devienne un gros château	Connu approximativement	0,1	0,3
Probabilité qu'un château situé à proximité d'une église paroissiale devienne un gros château	Connu approximativement	0,5	0,8
Distance minimale séparant deux châteaux	Plutôt bien connu	5 000 m.	
Autres entités			
Attractivité de chaque catégorie d'attracteurs	Connu approximativement	Cf. tableau 15	
Distance entre les attracteurs pour la constitution des pôles	Plutôt bien connu	200 m.	
Nombre minimum de foyers paysans pour la constitution des agrégats de population	Plutôt bien connu	5	
Nombre de foyers paysans dans les villages à l'état initial	Plutôt bien connu	5	10
Distance entre les foyers paysans pour la constitution des agrégats de population	Plutôt bien connu	100 m.	

Quelques paramètres ont pu être estimés directement par les archéologues et historiens concepteurs du modèle, à savoir les paramètres d'appréciation de la distance à l'église paroissiale la plus proche ; les paramètres d'appréciation de la distance au château le plus proche ; l'intensité du besoin de protection ; la probabilité qu'un château situé à proximité d'une église paroissiale devienne un gros château ; la distance minimale séparant deux châteaux ; la distance entre les attracteurs pour la constitution des pôles ; la distance entre les foyers paysans et le nombre minimum de foyers paysans pour la constitution des agrégats de population.

Tableau 15. Modifications successives des valeurs d'attractivité des attracteurs composant un pôle d'attraction.

Attracteur	Étape 0	Étape 1	Étape 3	Étape 4	Étape 6
Petit château	0,17	0,05	0,10	0,10	0,15
Gros château	0,34	0,35	0,35	0,15	0,25
Une église	0,17	0,05	0,10	0,05	0,15
Deux églises	0,34	0,25	0,25	0,25	0,25
Trois églises	0,51	0,55	0,55	0,55	0,50
Quatre églises et plus	0,66	0,65	0,65	0,65	0,60
Communauté			0,10	0,10	0,15

Les valeurs des autres paramètres ont été fixées initialement, puis ajustées pas à pas si besoin, au moyen de simulations successives (cf. tableaux 14, 15 et 17). Ce faisant, la conception du modèle SimFeodal a consisté en une alternance de phases de modélisation, de paramétrage, et d'évaluation et validation. Quelques objectifs macro-géographiques quantitatifs à atteindre en fin de simulation ont été fixés pour une situation empirique spécifique, à savoir la Touraine (Tableau 16). Les autres objectifs de simulation ont été définis qualitativement : fixation de l'habitat (constitution d'agrégats de foyers paysans de plus en plus pérennes au cours du temps), polarisation (création de pôles d'attraction autour desquels se fixent les foyers paysans) et hiérarchisation du système de peuplement (au cours du temps, les pôles se différencient en termes d'attraction et les agrégats liés à un pôle très attractif se développent davantage que les autres). L'évaluation des résultats du modèle au regard de ces objectifs qualitatifs se fait via l'observation de courbes et de graphiques (par exemple, la distribution rang-taille des agrégats de population en cours de simulation ou bien le nombre d'églises paroissiales créées à chaque pas de simulation). Le suivi visuel de l'évolution de la configuration spatiale du système de peuplement permet également d'évaluer la cohérence des dynamiques spatiales simulées.

Le modèle SimFeodal comporte plusieurs tirages probabilistes, par exemple pour déterminer si un foyer paysan effectue un déplacement local ou lointain, pour déterminer si un château devient un gros château, ou encore pour déterminer si une nouvelle église paroissiale va être créée ou non au sein d'un agrégat de foyers paysans. Par conséquent, pour un même jeu de valeurs de variables et de paramètres, les résultats fournis par le modèle sont susceptibles de varier d'une simulation à une autre. Plusieurs répliques d'une même simulation ont donc été considérées à chaque fois lors de l'analyse des résultats de simulation¹⁸.

18 Le nombre de répliques a varié entre 3 et 20 selon les étapes de conception du modèle.

Tableau 16. Nombre d'entités dans l'espace modélisé en début de simulation et objectifs à atteindre en fin de simulation. * : estimation jugée plausible. + : nombre fondé sur les données de la Touraine. Source : Cura *et al.* (sous presse).

Entités	Variétés	Nombre en début de simulation	Objectifs à atteindre en fin de simulation (ordre de grandeur)
Foyers Paysans	Mobiles et non mobiles	4000*	4000*
	Part de foyers paysans mobiles	20 %*	20 %*
	Part de foyers paysans dispersés	95 % environ*	20 %*
Agrégats de population	Village	20*	200*
	Agglomération	4 ⁺ (agglomérations secondaires d'origine antique)	16 ⁺ (nombre connu pour l'Indre-et-Loire)
Seigneurs	Grands Seigneurs	2 ⁺	2 ⁺
	Petits Seigneurs	18*	200*
Zones de Prélèvement	Loyers	18*	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits de haute justice	0 ⁺	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits de basse et moyenne justice	0 ⁺	Objectif non fixé <i>a priori</i>
	Droits banaux	0 ⁺	Objectif non fixé <i>a priori</i>
Attracteurs (effectifs ou potentiels)	Églises paroissiales	50 ⁺	200 ⁺
	Églises sans statut paroissial	150 ⁺	100 ⁺
	Châteaux	0 ⁺	50 ⁺ (dont 10 à 15 gros châteaux)

Tableau 17. Alternance de phases de modélisation, de paramétrage, et d'évaluation et validation pour la conception du modèle SimFeodal. Conception : C. Tannier et R. Cura, juin-septembre 2017.

Étape de conception du modèle	Évaluation et validation des résultats de simulation
<p>Étape 0 : modélisation et paramétrage initial Cf. tableau 14.</p>	<p>Nombre d'églises paroissiales (~180) légèrement inférieur au nombre attendu.</p> <p>Trop peu de gros châteaux (~5).</p> <p>Trop faible hiérarchisation du système de peuplement.</p> <p>Suffisamment d'agrégats de foyers paysans (~ 185).</p> <p>Beaucoup trop de foyers paysans isolés (c'est-à-dire localisés hors d'un village ou d'une ville) en fin de simulation (~ 57 %).</p>
<p>Étape 1 : paramétrage Modification des valeurs d'attraction des attracteurs (cf. tableau 15). Pour les paroisses localisées en-dehors d'un agrégat, augmentation du nombre minimum de foyers paysans insatisfaits dans l'aire de desserte de l'église paroissiale requis pour créer un nouvelle paroisse : 10. Pour les paroisses localisées dans un agrégat, diminution du nombre minimum de foyers</p>	<p>La hiérarchisation du système de peuplement est satisfaisante jusqu'en milieu de simulation, puis s'affaïsse en fin de simulation.</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 168).</p> <p>Trop de foyers paysans isolés (~ 49%).</p> <p>Les constructions de châteaux débutent trop tardivement en cours de simulation.</p> <p>Trop de châteaux (~ 70). Nombre de gros châteaux satisfaisant (~10).</p>

<p>paysans dans l'agrégat requis pour créer une nouvelle paroisse : 200.</p> <p>Réduction de la distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local : 5000 m.</p> <p>Augmentation de la probabilité qu'un château isolé devienne un gros château : 0,3.</p> <p>Augmentation de la probabilité qu'un château situé à proximité d'une église paroissiale devienne un gros château : 0,8.</p>	<p>Trop peu d'agrégats de population (~ 145).</p> <p>De nombreux petits agrégats se font et se défont en cours de simulation, au fur et à mesure de l'apparition de nouveaux pôles d'attraction. Qui plus est, les plus gros agrégats se dépeuplent en 2ème période de simulation.</p> <p>Entre 1040 et 1160, la plupart des foyers paysans ont une satisfaction comprise entre 0,5 et 0,75 et se déplacent constamment pour tenter d'atteindre une satisfaction égale à 1.</p>
<p>Étape 2 : modélisation et paramétrage</p> <p>Pour les paroisses localisées dans un agrégat, diminution du nombre minimum de foyers paysans dans l'agrégat requis pour créer une nouvelle paroisse : 100.</p> <p>Réduction de la distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local : 2500 m.</p> <p>Modification des règles de calcul de la probabilité de construire un château.</p> <p>Pour le calcul de la satisfaction des foyers paysans, suppression de la variable de mécanisme liée à la puissance armée du seigneur châtelain.</p>	<p>Il n'y a toujours pas de châteaux construits jusqu'en 940.</p> <p>Après 940, les foyers paysans deviennent majoritairement très insatisfaits, d'où un très grand nombre de déplacements.</p> <p>Trop peu d'agrégats de population (~ 138).</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 175).</p> <p>Beaucoup trop de foyers paysans isolés (~ 62 %).</p> <p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de gros châteaux (~ 13) un peu trop élevé.</p>
<p>Étape 3 : modélisation et paramétrage</p> <p>Modification des valeurs d'attraction des attracteurs (cf. tableau 15).</p> <p>Trois (et non deux) tirages successifs de probabilité de construire un château pour les grands seigneurs.</p> <p>Modification du mécanisme de déplacement des foyers paysans en introduisant une comparaison entre les aspects <i>push</i> (insatisfaction en leur localisation actuelle) et <i>pull</i> (attractivité d'autres localisations possibles).</p> <p>Ajout d'un nouveau type d'attracteur, les communautés villageoises (cf. tableau 15).</p>	<p>En de nombreux lieux de l'espace modélisé, les pôles d'une part, et les agrégats d'autre part, sont quasiment contigus les uns aux autres (rassemblement de plusieurs pôles et plusieurs agrégats en un même lieu).</p> <p>Très faible fixation des foyers paysans dans un agrégat en cours de simulation.</p> <p>Trop peu d'agrégats de population (~ 124).</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 156).</p> <p>Trop de châteaux (~ 66) et de gros châteaux (~ 19).</p> <p>Trop de foyers paysans isolés (~ 49%).</p>
<p>Étape 4 : modélisation et paramétrage</p> <p>Modification des valeurs d'attraction des attracteurs (cf. tableau 15).</p> <p>Pour les paroisses localisées en-dehors d'un agrégat, augmentation du nombre minimum de foyers paysans insatisfaits dans l'aire de desserte de l'église paroissiale requis pour créer une nouvelle paroisse : 20.</p> <p>Pour les paroisses localisées dans un agrégat, augmentation du nombre minimum de foyers paysans dans l'agrégat requis pour créer une nouvelle paroisse : 300.</p>	<p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de gros châteaux (~ 9) satisfaisant.</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 154).</p> <p>Le modèle reproduit bien le processus de hiérarchisation du système de peuplement : le nombre d'agrégats de foyers paysans croît tout au long de la période de simulation. La taille des agrégats change aussi au fil du temps : au départ compris entre 5 et 40 foyers paysans environ en 800, les plus gros agrégats rassemblent presque 200 foyers paysans en 920, et encore un peu plus à partir de 1020.</p> <p>Trop peu d'agrégats de foyers paysans (83 agrégats en moyenne en fin de simulation).</p> <p>Proportion de foyers paysans isolés trop élevée (48 % en moyenne</p>

<p>Augmentation de la distance maximale, depuis le lieu d'implantation actuel, pour un déplacement local : 4000 m.</p> <p>Modification de la procédure d'identification des agrégats de foyers paysans.</p> <p>Modification de la procédure d'identification des pôles d'attraction.</p>	<p>en fin de simulation).</p>
<p>Étape 5 : modélisation et paramétrage</p> <p>Nombre de foyers paysans dans les villages présents en début de simulation (paramètre <i>nombre_FP_village</i> égal) à 10.</p> <p>Simplification des mécanismes de détection d'agrégats et d'héritage de communautés villageoises.</p> <p>Amélioration de la définition des pôles d'attraction et de leur enveloppe.</p>	<p>Vraiment trop peu d'agrégats (~ 21) en fin de simulation.</p> <p>Proportion de foyers paysans isolés satisfaisante (~ 30%).</p> <p>Hiérarchie trop faible des agrégats de population : les plus gros agrégats sont beaucoup trop gros.</p> <p>Les foyers paysans se déplacent uniquement de gros agrégat en gros agrégat.</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 144).</p> <p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de gros châteaux (~ 9) satisfaisant.</p>
<p>Étape 6 : modélisation et paramétrage</p> <p>Modification des valeurs d'attraction des attracteurs (cf. tableau 15).</p> <p>Modification de l'ordonnancement des actions dans le modèle.</p> <p>Modification de la procédure d'identification des agrégats de foyers paysans.</p>	<p>Bonne hiérarchisation du système de peuplement au cours du temps.</p> <p>Bien trop peu d'agrégats (~ 34). Les plus gros agrégats sont beaucoup trop importants.</p> <p>Diminution de la part de foyers paysans isolés (jusqu'à 34% environ en fin de simulation).</p> <p>La majorité des églises paroissiales ne connaissent pas de création d'agrégat autour d'elles.</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 153).</p> <p>La délimitation des pôles d'attraction est visuellement plus pertinente que celle des agrégats. Dans un nombre de cas non négligeable, de petits agrégats se jouxtent.</p> <p>Un peu trop de foyers paysans isolés (~ 33 %).</p> <p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de gros châteaux (~ 9) satisfaisant.</p>
<p>Étape 7 : modélisation et paramétrage</p> <p>Pour les foyers paysans, augmentation du rayon de la distance de déplacement local au cours du temps : 2,5 km entre 800 et 880 ; puis 4 km entre 900 et 980 ; puis 6 km à partir de 1000.</p> <p>Modification du modèle : ne pas appartenir à une communauté est un désavantage "absolu" quels que soient les autres niveaux d'insatisfaction.</p>	<p>Meilleure hiérarchisation du système de peuplement.</p> <p>Le rapport entre le nombre de petits agrégats et le nombre de grands est davantage satisfaisant.</p> <p>Trop peu d'agrégats (~ 59) en fin de simulation.</p> <p>Encore trop de foyers paysans isolés en fin de simulation (~ 35%). En début de simulation, la part de foyers paysans isolés diminue de façon satisfaisante mais cette diminution cesse aux environs de l'an 1000.</p> <p>Un nombre assez élevé d'églises paroissiales ne comporte pas d'agrégats dans leur entourage. De fait, le nombre d'agrégats est moins élevé que le nombre d'églises paroissiales.</p> <p>Trop peu d'églises paroissiales (~ 164).</p> <p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p>

	Nombre de gros châteaux (~ 9) satisfaisant.
<p>Étape 8 : modélisation</p> <p>Modification de l'ordonnancement des actions dans le modèle.</p> <p>Modification du mécanisme de déplacement local des foyers paysans.</p>	<p>Bonne hiérarchisation du système de peuplement au cours du temps.</p> <p>Augmentation du nombre d'agrégats de foyers paysans en cours de simulation, jusqu'à 90 agrégats environ en l'an 1000, puis augmentation très lente, voire stagnation du nombre d'agrégats.</p> <p>Trop peu d'agrégats (~ 105) en fin de simulation.</p> <p>Bonne polarisation du système de peuplement (augmentation du nombre de pôles et hiérarchisation de la taille des pôles).</p> <p>Diminution de la part de foyers paysans isolés (jusqu'à 26 % en moyenne en fin de simulation).</p> <p>Fixation des agrégats de foyers paysans majoritairement autour des églises paroissiales.</p> <p>Répartition plus homogène des agrégats de foyers paysans dans l'espace du modèle.</p> <p>Nombre d'églises paroissiales (~ 187) légèrement inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de châteaux (~ 44) un peu inférieur au nombre attendu.</p> <p>Nombre de gros châteaux (~ 11) satisfaisant.</p> <p>Les serfs, soit 20 % des foyers paysans, ne se déplacent pas.</p>
<p>Étape 9 : modélisation</p> <p>Modification du modèle afin de représenter le fait que les serfs puissent entreprendre un déplacement local.</p>	

Commentaires du tableau 17

Étape 2

Modification des règles de calcul de la probabilité de construire un château. Pour les grands seigneurs, on représente une croissance exponentielle de la probabilité de construire un château au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance du seigneur ; cette probabilité fait l'objet de deux tirages successifs. Pour les petits seigneurs, on représente une croissance linéaire de la probabilité de construire un château en fonction de la puissance du seigneur ; cette probabilité fait l'objet d'un seul tirage. Le paramétrage de ces mécanismes (paramètre *puissance_seign*) a été basé sur l'évolution des distributions stats (moy, Q1 et Q3) des puissances minimale, maximale et moyenne des seigneurs au cours de la simulation.

Diminution du rayon de déplacement local des foyers paysans à 2500 m. Ce faisant, les foyers paysans ont moins tendance à quitter les gros agrégats quand un agrégat plus petit émerge dans leur voisinage.

Modification du calcul de la satisfaction des foyers paysans : suppression de la variable de mécanisme liée à la puissance armée du seigneur châtelain. En effet, cette variable s'avère impossible à paramétrer et inutile. La distance du foyer paysan au château le plus proche suffit pour représenter la réponse au besoin de protection.

Étape 3

Ajout d'un nouveau type d'attracteur (les communautés villageoises) afin que les pôles, même petits, deviennent davantage attractifs.

Modification du mécanisme de déplacement des foyers paysans : on identifie d'abord le pôle le plus attractif localement. Puis on calcule la probabilité de déplacement local comme suit :

$$p(\text{deplacement_local}) = \text{MAX} [(\text{Attractivité du pôle le plus attractif localement} - \text{Satisfaction_FP}) ; 0]$$

Si la probabilité de déplacement local se réalise, on détermine le pôle que le foyer paysan choisira pour s'y localiser, en appliquant une loterie pondérée par l'attractivité de chaque pôle. Si la probabilité de déplacement local ne se réalise pas, on calcule la probabilité de déplacement lointain comme suit :

$$p(\text{deplacement_lointain}) = 0,2 \times (1 - \text{Satisfaction_FP}).$$

Ce faisant, les foyers paysans ont moins tendance à quitter un agrégat une fois qu'ils y sont installés.

Étape 4

Nouvelle méthode d'identification des agrégats : celle-ci consiste désormais en l'enveloppe convexe des foyers paysans et des attracteurs éloignés les uns des autres de 100 m. au plus, élargie d'une zone tampon de 100 m. de large.

Nouvelle méthode de définition des pôles : si plusieurs attracteurs sont dans un même agrégat, on considère désormais qu'ils forment un seul et unique pôle quand bien même soient-ils éloignés de plus de 200 m. L'emprise spatiale du pôle correspond alors à celle de l'agrégat élargie d'une zone tampon de 200 m. de large. Cette emprise spatiale du pôle est reprise au pas de simulation suivant.

Étape 5

Tests de la modification de la valeur du paramètre déterminant le nombre de foyers paysans dans les villages créés à l'initialisation du modèle (nombre_FP_village). La valeur de ce paramètre était fixée à 5. Les tests effectués ont consisté à augmenter cette valeur de 1 en 1 jusqu'à 10. Au fur et à mesure de cette augmentation, on obtient en fin de simulation davantage d'agrégats de foyers paysans, ce qui correspond à l'objectif poursuivi, mais en contre-partie, la part de foyers paysans isolés augmente aussi. On choisit de fixer la valeur du paramètre à 10 en espérant parvenir à diminuer la part de foyers paysans isolés via la modification d'autres aspects du modèle.

Étape 6

Modification de la procédure d'identification des agrégats de foyers paysans : fusion des agrégats qui se touchent (ou s'intersectent) en un seul agrégat à chaque pas de simulation.

Étape 7

Modification du modèle : pour un foyer paysan, ne pas appartenir à une communauté villageoise représente désormais un désavantage "absolu" quels que soient les autres niveaux d'insatisfaction. A cet effet, le calcul de la satisfaction d'un foyer paysan est définie comme suit :

$$\text{Satisfaction_FP} = 0,75 [\text{MIN} (S_{\text{matérielle}} ; S_{\text{religieuse}} ; S_{\text{protection}})] + 0,25 [S_{\text{communauté}}]$$

Avec $S_{\text{communauté}}$ égale à 0 si le foyer paysan n'est pas dans un agrégat ou bien est dans un agrégat ne comportant pas de communauté, ou égale à 1 si le foyer paysan est dans un agrégat doté d'une communauté.

Étape 8

Modification du modèle : le calcul de la probabilité de déplacement local d'un foyer paysan défini à l'étape 3 de la conception du modèle n'est pas satisfaisant car, en début de période de simulation, le MAX de la différence entre l'attractivité d'un agrégat (le plus souvent égale à 0,15) et la satisfaction potentielle du foyer paysan vis-à-vis de cet agrégat (le plus souvent égale à 0,75) d'une part, et zéro d'autre part, est égal à zéro. En effet, en début de période de simulation, les foyers paysans sont globalement satisfaits même s'ils sont

loin d'une église paroissiale car ils ne payent quasiment pas de redevances et n'ont pas de besoin de protection. Ce faisant, les foyers paysans ne se déplacent pas. On définit désormais la probabilité de déplacement local ainsi :

$$p(\text{deplacement_local}) = 1 - \text{Satisfaction_FP}$$

Pour éviter qu'il y ait trop de foyers paysans isolés, une règle supplémentaire fixe qu'un foyer paysan localisé dans un agrégat peut se déplacer localement uniquement si un autre agrégat dans un rayon égal à *distance_max_dem_local* contient un pôle davantage attractif.

Le calcul de la probabilité de déplacement lointain reste inchangé :

$$p(\text{deplacement_lointain}) = 0,2 \times (1 - \text{Satisfaction_FP})$$

Étape 9

Modification du modèle : activation de la règle selon laquelle les serfs peuvent entreprendre un déplacement local (dans les versions précédentes, les serfs ne pouvaient pas se déplacer).

La version du modèle présentée dans le chapitre d'ouvrage (Cura *et al.* sous presse) est celle obtenue à l'issue de l'étape 4 de conception du modèle (version *base* 3.1). A l'issue de l'étape 9, les résultats de simulation ont été jugés satisfaisants (Tableau 18) et la conception du modèle terminée (version 4.5 - <https://github.com/RCura/SimFeodal>).

Tableau 18. Résultats de 20 répliquions d'une simulation sur la Touraine entre 800 et 1160 obtenus avec le modèle SimFeodal (version 4.5).

Indicateur	Valeur attendue	Moyenne	Médiane	1 ^{er} quartile	3 ^{ème} quartile	Écart-type
Agrégats	200	107	107	104	110	7,16
Châteaux	50	44	44	44	44	0
Gros châteaux	10	12	12	11	12	1,09
Seigneurs	200	197	196	193	200	8,13
Églises paroissiales	300	199	200	191	205	7,91
Distance moyenne entre églises	3 000 m	1 890 m	1 959 m	1 674 m	2 045 m	222 m
Part de foyers paysans isolés	20 %	13 %	13 %	12 %	14 %	1,3 %
Augmentation de la charge fiscale des foyers paysans	x 3	x 4	x 4	x 4	x 5	x 0,8

Grâce à la connaissance du fonctionnement du modèle acquise à travers les différentes étapes de sa conception, il a été possible d'identifier quelques paramètres clefs pour lesquels un calibrage du modèle est nécessaire. Il s'agit du taux de croissance du nombre de foyers paysans à chaque pas de simulation (valeur par défaut égale à 0 %), de la probabilité pour un foyer paysan d'effectuer un déplacement lointain s'il n'a pas déjà effectué un déplacement local (valeur par défaut égale à 0,2), du nombre de foyers paysans dans les villages présents à l'initialisation du modèle (valeur par défaut égale à 10) et du rayon de la distance de déplacement local (valeur par défaut égale à 2,5 km entre 800 et 880, 4 km entre 900 et 980 et 6 km à partir de 1000). Un calibrage automatique est à l'heure actuelle difficilement envisageable pour le modèle SimFeodal. D'une part, les objectifs quantitatifs fixés dans le tableau 16 sont approximatifs. D'autre part, la qualité des résultats de simulation doit être évaluée aussi au regard d'objectifs qualitatifs par exemple, les agrégats de

population doivent devenir de plus en plus pérennes au cours du temps. Un autre aspect du modèle, qui freine la mise en œuvre d'un calibrage automatique, est que les taux d'apparition et de disparition des agrégats à chaque pas de simulation ne sont pas forcément censés évoluer linéairement, suivant une tendance qui serait simplement croissante ou décroissante et donc, aisée à transcrire sous la forme d'un objectif chiffré.

Par conséquent, un calibrage non automatique est prévu à court terme¹⁹, qui consiste en vingt-trois tests de modification de valeurs de paramètres pour vingt réplifications de chaque simulation (soit 460 simulations au total) :

- modification du paramètre *nombre_FP_village* entre 5 et 9 (valeur par défaut égale à 10) ; autres paramètres inchangés ;
- 0,06% de croissance du nombre de foyers paysans ; valeur du paramètre *p_depl_lointain* égale à 0,2 (valeur par défaut), 0,5 et 0,7 ; valeur du paramètre *nombre_FP_village* égale à 5 et à 10 ;
- 0,22% de croissance du nombre de foyers paysans ; valeur du paramètre *p_depl_lointain* égale à 0,2 (valeur par défaut), 0,5 et 0,7 ; valeur du paramètre *nombre_FP_village* égale à 5 et à 10 ;
- rayon de la distance de déplacement local des foyers paysans au cours du temps égal à 2,5 km entre 800 et 880, 4 km entre 900 et 980, puis 4 km à partir de 1000 ; valeur du paramètre *nombre_FP_village* égale à 5 et à 10.

Il restera ensuite, en vue d'une application du modèle à d'autres régions que la Touraine, à travailler sur les valeurs de paramètres dont l'ordre de grandeur est relatif au scénario simulé, à savoir le paramètre d'appréciation du montant des redevances seigneuriales acquittées (*coef_redevances*), la probabilité pour un grand seigneur de créer un ou plusieurs châteaux en fonction de sa puissance et la probabilité pour un petit seigneur de créer un château en fonction de sa puissance. En effet, il est possible que la puissance des seigneurs varie notablement en fonction de deux valeurs d'inputs du modèle qui sont le nombre de grands seigneurs et de petits seigneurs en début de simulation.

19 Ce calibrage sera réalisé dans le cadre de la recherche doctorale de R. Cura (UMR Géographie-cités, Paris).

4. Analyse et interprétation des résultats de simulation

Dans chacun des modèles SimFeodal, MobiSim-MR et MobiSim-DR, les mécanismes génératifs représentent le fait que les choix des lieux d'implantation des agents résultent des caractéristiques différenciées des lieux au regard des caractéristiques de chaque agent. La mise en œuvre des mécanismes génératifs, pour une certaine configuration socio-spatiale initiale, induit des choix de localisation des agents qui modifient ou non la configuration socio-spatiale initiale. Les analyses des résultats de simulation présentées dans ce mémoire visent à décrire et comprendre les effets des mécanismes modélisés sur les configurations socio-spatiales simulées. Celles-ci consistent en des états de concentration ou de dispersion des implantations humaines (bâtiments, ménages et foyers paysans) et, dans le cas de MobiSim-MR et SimFeodal uniquement, des mouvements des agents (mobilités résidentielles des ménages et déplacements des unités d'exploitation des foyers paysans)²⁰.

Il ne s'agit pas de présenter ici une étude complète et détaillée de l'ensemble des résultats de simulation obtenus avec chaque modèle mais de quelques résultats illustratifs²¹. Au niveau macro-géographique, à savoir chaque zone d'étude vue comme un tout, les états de concentration et de dispersion sont étudiés au moyen d'indicateurs synthétiques globaux et de distributions rang-taille des entités spatiales (agrégats bâtis dans le cas de MobiSim-DR, communes dans le cas de MobiSim-MR, agrégats de foyers paysans et pôles d'attraction dans le cas de SimFeodal). Les analyses au niveau méso-géographique concernent l'évolution du nombre d'agents (bâtiments, ménages et foyers paysans) dans chaque entité spatiale au cours du temps. Une cartographie des résultats de ces analyses est possible pour MobiSim-DR et MobiSim-MR car les entités spatiales (agrégats bâtis et communes) sont fixes pour toutes les réplifications d'une même simulation. Pour SimFeodal en revanche, le nombre et la localisation des agrégats de foyers paysans varient selon les réplifications. Il est donc impossible de cartographier le taux d'évolution du nombre de foyers paysans par agrégat pour un ensemble de réplifications d'une même simulation. Pour les trois modèles, les trajectoires individuelles des entités de niveau micro-géographique (point de vue thématique) ou élémentaire (point de vue méthodologique) ne sont pas étudiées.

4.1 Étude de cinq scénarios simulés avec MobiSim-DR

Cinq scénarios de développement résidentiel 2010-2030 ont été simulés avec MobiSim-DR pour l'aire urbaine de Besançon : urbanisation compacte (scénario 1), urbanisation modérément compacte (scénario 2), périurbanisation contrôlée (scénario 3), étalement urbain (scénario 4), et urbanisation à proximité des haltes ferroviaires et des stations de tramway (scénario 5). Ces scénarios sont décrits en détail dans (Tannier, Bourgeois *et al.* 2016), section 2.4.3. Les caractéristiques identiques pour les cinq scénarios sont les suivantes :

- en inputs : le nombre et la localisation des bâtiments existants ; les délimitations des agrégats bâtis différenciés en trois classes de taille : l'agrégat bâti principal (d'une surface supérieure à 10 km²), les agrégats bâtis de taille intermédiaire (1 à 10 km²) et les agrégats

20 En termes d'objets d'analyses géographiques, H. Mathian et L. Sanders (2014) définissent un agent comme étant une entité endurente qui forme un tout observable et existe, en chaque instant, en maintenant son identité. La trajectoire socio-spatiale d'un agent est, elle, une entité perdurante : elle se réfère aux événements et aux processus. Une coupe de la seconde correspond à un état de la première.

21 Concernant les modèles MobiSim-DR et MobiSim-MR, les résultats présentés sont originaux dans le sens où les analyses ont été effectuées spécialement pour ce mémoire.

bâties de petite taille (0,2 à 1 km²). Aucun bâtiment n'est créé par simulation dans les agrégats de taille inférieure à 0,2 km² (hameaux et bâtiments isolés) ;

- variable de contexte : le nombre total de logements à créer dans la zone d'étude (1400 logements par an) ;
- paramètre de mécanisme : le nombre de pièces dans les immeubles collectifs (environ 30).

Tableau 19. Paramètres du développement résidentiel des cinq scénarios simulés.

SCENARIO	Distribution de la croissance résidentielle (% du nombre total de logements construits chaque année)			Dimension fractale	Proportion de logements en maisons individuelles et en appartement (%)					
	Agrégat bâti principal	Agrégats bâties de taille moyenne	Agrégats bâties de petite taille		Appart.	Maison	Appart.	Maison	Appart.	Maison
					Agrégat principal		Agrégats de taille moyenne		Agrégats de petite taille	
Compact	80	15	5	1.8	70	30	30	70	0	100
Modérément compact	80	15	5	1.5	70	30	30	70	0	100
Périurbain régulé	40	30	30	1.8	70	30	50	50	0	100
Etalement urbain	40	30	30	1.8 (agrégat principal) 1.5 (agrégats secondaires)	70	30	30	70	0	100
Développe- ment orienté transport	Stations de tram (buffer 500m)	Stations de TER principales (buffer 1000m)	Stations de TER secondaires (buffer 500m)		Stations de tram (buffer 500m)		Stations de TER principales (buffer 1000m)		Stations de TER secondaires (buffer 500m)	
					Appart.	Maison	Appart.	Maison	Appart.	Maison
	40	30	30	1.8 (agrégat principal) 1.5 (agrégats secondaires)	70	30	50	50	0	100

D'autres éléments varient en fonction des scénarios. En input, la carte d'intérêt des cellules de 20 m. de côté à être urbanisées, créée avec l'application MUP-City (cf. chapitre 3, section 3.1 de ce mémoire), est différente pour chaque scénario. Cette carte détermine notamment la dimension fractale du développement résidentiel simulé (Tableau 19). Elle détermine aussi les lieux de développement résidentiel potentiel, qui varient selon l'importance respective accordée aux différentes règles d'aménagement dans MUP-City. Dans le cas des scénarios 1 à 4, davantage d'importance est accordée à la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne (boulangeries, épiceries, écoles...) et aux stations de transport public (tram, train). Une importance moindre est accordée à la proximité au réseau routier existant et aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire (supermarchés, médecins...). La proximité aux espaces ouverts revêt une importance intermédiaire. Dans le scénario 5, la proximité aux stations de transport public est prépondérante par rapport aux autres critères. La proximité aux commerces de services de fréquentation quotidienne est un peu moins importante. La proximité au réseau routier, aux espaces ouverts et aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire l'est encore moins. Varient également en fonction des scénarios la fréquence de chaque catégorie de logements à créer dans chaque agrégat bâti (variable de contexte) et la répartition, entre les différentes unités de

peuplement, du nombre de logements à créer de chaque catégorie (variable de mécanisme) (Tableau 19).

Tableau 20. Caractéristiques morphologiques des configurations bâties en 2010 (état initial) et en 2030 (configurations simulées) pour chaque scénario de développement résidentiel. Les seuils de distance pour la délimitation des agrégats bâtis ont été identifiés avec MorphoLim pour un polynôme du 6^{ème} degré.

	Nombre de bâtiments construits par simulation	Seuil de distance (en m.) pour la délimitation des agrégats bâtis	Nombre total d'agrégats bâtis	Nombre d'agrégats bâtis de taille supérieure à 0,2 km ²
Bâti initial	-	273,7	954	262
Scénario 1	12 824	267,6	974	257
Scénario 2	12 834	267,6	966	254
Scénario 3	17 194	267,6	962	252
Scénario 4	17 197	271,6	913	250
Scénario 5	17 195	271,6	930	249

65 119 bâtiments sont présents dans la zone d'étude à l'état initial (en 2010). Entre 12 824 et 17 197 bâtiments résidentiels (immeubles collectifs ou maisons individuelles) sont construits par simulation d'ici 2030 (Tableau 20)²². Davantage de bâtiments sont construits dans le cas des scénarios 3, 4 et 5, qui comptent davantage de logements en maison individuelle et moins de logements en immeuble collectif que les scénarios 1 et 2. La dimension fractale globale des configurations bâties en 2010 et 2030 permet de caractériser la concentration et la dispersion des bâtiments à travers les échelles à un niveau macro-géographique. Elle est à peine plus élevée pour chacun des scénarios que pour la configuration bâtie initiale mais les différences de valeurs ne sont pas statistiquement significatives (Tableau 21).

Tableau 21. Dimensions fractales des configurations bâties en 2010 (état initial) et en 2030 (configurations simulées) pour chaque scénario de développement résidentiel. Dimensions calculées avec l'algorithme de *box counting* du logiciel FracGIS version 0.5.7 selon le protocole décrit dans (Tannier & Thomas 2013).

Scénario	Tailles de boîtes comprises entre 8 et 16 384 m.	Tailles de boîtes comprises entre 8 et 4 096 m.
Bâti initial	Dimension : 1,37 R2 : 0,994123 p-value : 1,73017e-12 Confidence (95%): [1,293 - 1,441] Bootstrap confidence : [1,267 - 1,447]	Dimension : 1,29 R2 : 0,996666 p-value : 3,38123e-11 Confidence (95%): [1,231 - 1,353] Bootstrap confidence : [1,223 - 1,360]
Scénario 1	Dimension : 1,39 R2 : 0,995475 p-value : 4,67848e-13 Confidence (95%): [1,324 - 1,456] Bootstrap confidence : [1,298 - 1,455]	Dimension : 1,32 R2 : 0,997617 p-value : 8,82139e-12 Confidence (95%): [1,269 - 1,374] Bootstrap confidence : [1,265 - 1,375]

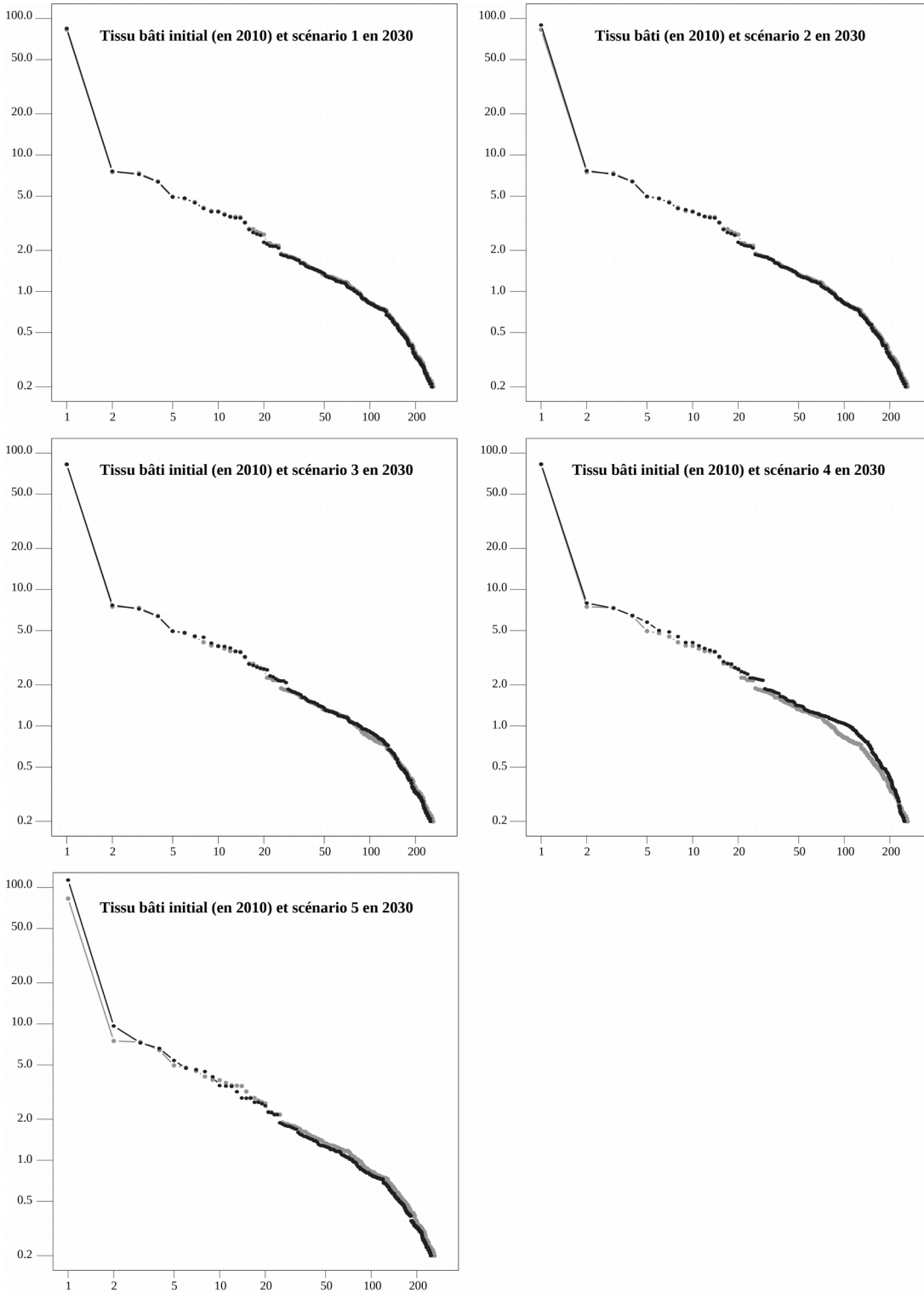
²² Les simulations de scénarios effectuées MobiSim-DR n'ont pas fait l'objet de répliquions, contrairement aux simulations effectuées avec MobiSim-MR et SimFeodal.

Scénario	Tailles de boîtes comprises entre 8 et 16 384 m.	Tailles de boîtes comprises entre 8 et 4 096 m.
Scénario 2	Dimension : 1,40 R2 : 0,995510 p-value : 4,49862e-13 Confidence (95%): [1,327 - 1,458] Bootstrap confidence : [1,299 - 1,461]	Dimension : 1,33 R2 : 0,997599 p-value : 9,10272e-12 Confidence (95%): [1,272 - 1,378] Bootstrap confidence : [1,268 - 1,379]
Scénario 3	Dimension : 1,40 R2 : 0,995756 p-value : 3,39284e-13 Confidence (95%): [1,332 - 1,461] Bootstrap confidence : [1,306 - 1,462]	Dimension : 1,33 R2 : 0,997780 p-value : 6,64713e-12 Confidence (95%): [1,279 - 1,381] Bootstrap confidence : [1,275 - 1,381]
Scénario 4	Dimension : 1,40 R2 : 0,995683 p-value : 3,69704e-13 Confidence (95%): [1,336 - 1,466] Bootstrap confidence : [1,310 - 1,469]	Dimension : 1,33 R2 : 0,997657 p-value : 8,24452e-12 Confidence (95%): [1,282 - 1,387] Bootstrap confidence : [1,277 - 1,388]
Scénario 5	Dimension : 1,40 R2 : 0,995706 p-value : 3,59934e-13 Confidence (95%): [1,334 - 1,463] Bootstrap confidence : [1,309 - 1,464]	Dimension : 1,33 R2 : 0,997791 p-value : 6,51434e-12 Confidence (95%): [1,280 - 1,382] Bootstrap confidence : [1,276 - 1,384]

Le seuil de distance pour la délimitation des agrégats bâtis, propre à chaque configuration bâtie (Tableau 20), a été déterminé avec le logiciel MorphoLim selon la méthode proposée par C. Tannier, I. Thomas, G. Vuidel et P. Frankhauser (2011) (cf. chapitre 3, section 1.2 de ce mémoire.). L'enveloppe morphologique des agrégats bâtis ainsi définie est théoriquement celle pour laquelle l'organisation spatiale des bâtiments au sein de chaque agrégat se différencie le plus de celle des bâtiments situés en-dehors des agrégats. Les scénarios 1, 2 et 3 ont pour conséquence une légère diminution du seuil de distance par rapport à la situation initiale, une petite augmentation du nombre total d'agrégats bâtis et une petite diminution du nombre d'agrégats de taille supérieure à 0,2 km². Les scénarios 4 et 5 entraînent, eux, une moindre diminution du seuil de distance par rapport à la situation initiale, une diminution du nombre total d'agrégats bâtis et comptent, proportionnellement au nombre total d'agrégats, davantage d'agrégats de taille supérieure à 0,2 km² que la configuration bâtie initiale. Au regard de ces indicateurs, les bâtiments sont davantage concentrés, dans des agrégats moins nombreux et relativement plus gros, avec les scénarios 4 et 5 qu'avec les scénarios 1 et 2 quand bien même davantage de bâtiments ont été construits par simulation. Le scénario 3 correspond à une situation intermédiaire entre les scénarios 1 et 2 d'une part, et les scénarios 3 et 4 d'autre part. Ces résultats sont étonnants car on s'attendrait à ce que les scénarios 1 et 2, correspondant respectivement à un développement résidentiel compact et modérément compact, aboutissent à des configurations bâties simulées davantage concentrées que le scénario 4, qui correspond à un développement résidentiel plutôt étalé.

Les courbes de distribution rang-taille des agrégats bâtis permettent de nuancer ces observations (Figure 21). Si les configurations bâties suivaient une stricte logique hiérarchique (*i. e.* une loi d'échelle), le nombre d'agrégats bâtis diminuerait proportionnellement à leur surface et les courbes auraient la forme d'une droite. Ceci qui n'est pas le cas : les configurations bâties présentent toutes un agrégat bâti principal sur-dimensionné au regard d'une hiérarchie régulière et un grand nombre de très petits agrégats bâtis.

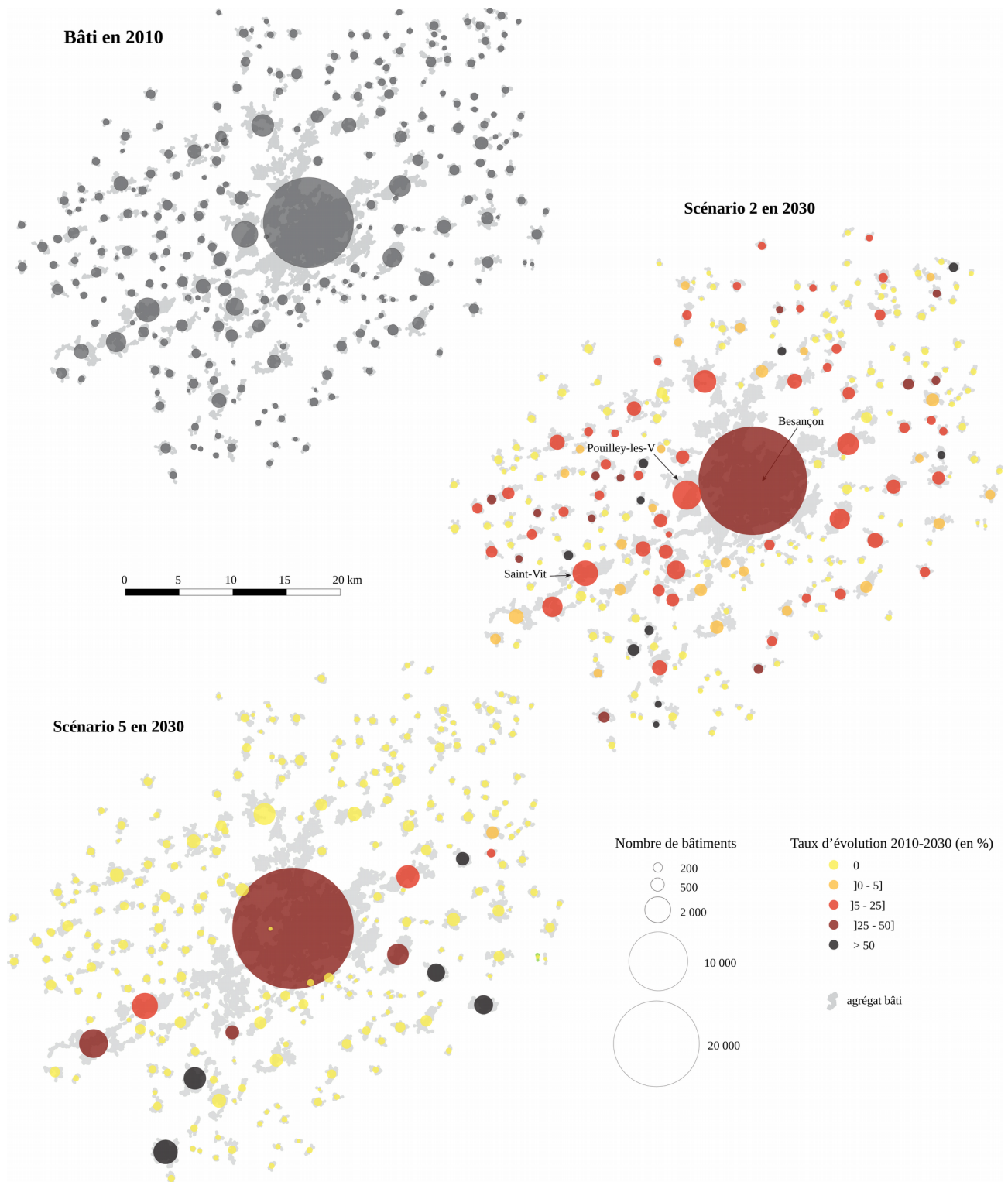
Figure 21. Distributions rang-taille des agrégats bâtis de taille supérieure à 0,2 km² pour cinq scénarios prospectifs simulés avec le modèle MobiSim-DR pour l'aire urbaine de Besançon (en noir) comparés à la situation initiale (en gris). Une seule réplique de chaque simulation. En abscisse : le rang de chaque agrégat ; en ordonnée : sa surface en km².



Ces courbes montrent également que la hiérarchie du système de peuplement en 2010 n'est quasiment pas modifiée avec les scénarios 1 et 2, qu'elle l'est légèrement avec le scénario 3, et qu'elle l'est davantage avec les scénarios 4 et 5. La courbe du scénario 4 (étalement urbain) présente une nette augmentation de la taille des petits agrégats bâtis ayant une surface supérieure à $0,2 \text{ km}^2$ (car aucun bâtiment n'est construit dans des agrégats de taille inférieure) au regard de la configuration bâtie initiale. Le scénario 5 présente, lui, une augmentation de la taille des plus gros agrégats et une diminution de celle des plus petits. Autrement dit, avec le scénario 4, la courbe s'éloigne davantage d'une droite (hiérarchie régulière) que celle de la configuration bâtie initiale tandis qu'avec le scénario 5, elle s'en rapproche davantage.

Bien que les configurations bâties ne changent pas ou assez peu entre 2010 et 2030 au regard des indicateurs macro-géographiques précédemment calculés, la croissance résidentielle est spatialement bien différenciée au niveau méso-géographique. La figure 22 en donne une illustration pour deux scénarios. Les différences entre les deux scénarios sont très nettes. Avec le scénario 2, la croissance résidentielle concerne tous les agrégats bâtis (avec une intensité variable) exceptés les plus petits tandis qu'avec le scénario 5, elle est concentrée dans douze agrégats seulement et suit une logique spatiale radiale autour de l'agrégat principal. Avec ce scénario, dans le secteur Ouest Sud-Ouest de l'aire urbaine, les développements résidentiels entraînent une extension de l'agrégat bâti principal. Ce faisant, un agrégat bâti assez important, présent en 2010 et situé à l'Ouest de Besançon (communes de Franois, Serre-les-Sapins et Pouilley-les-Vignes), ainsi que quelques agrégats secondaires situés au Sud-Ouest de Besançon disparaissent par fusion avec l'agrégat principal. Ces fusions expliquent en grande partie la forte augmentation de la surface de l'agrégat principal, visible sur la distribution rang-taille de la figure 21. Ce qui différencie le scénario 5 des autres scénarios est que certaines extensions résidentielles simulées modifient de façon importante les limites de quelques agrégats bâtis parmi les plus gros de la zone d'étude.

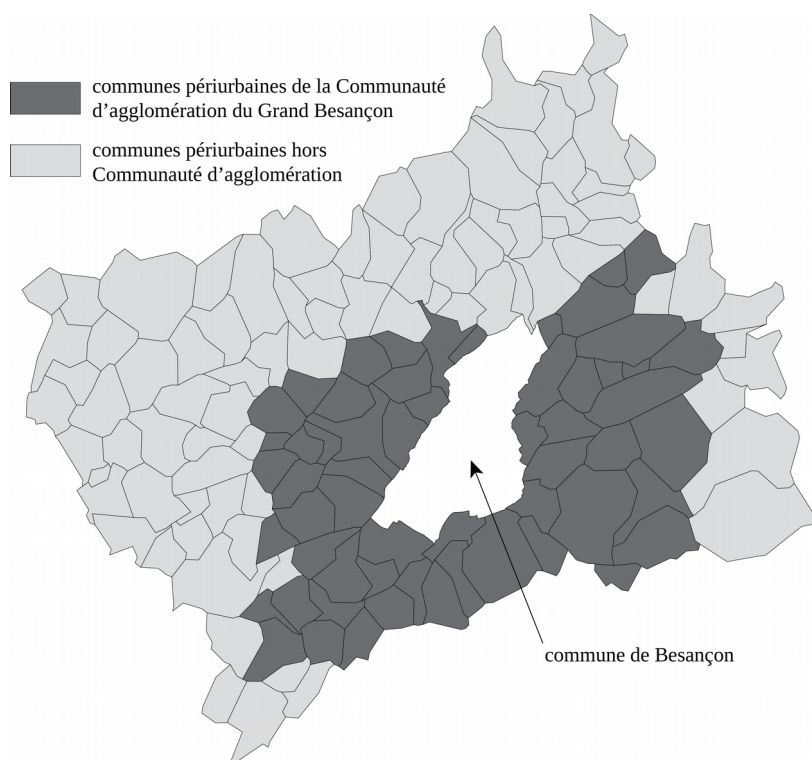
Figure 22. Nombre de bâtiments dans les agrégats bâtis en 2010 et en 2030, et taux d'évolution 2010-2030 pour deux scénarios prospectifs simulés avec le modèle MobiSim-DR pour l'aire urbaine de Besançon. La délimitation des agrégats en 2030 est propre à chaque scénario. Une seule réplique de chaque simulation.



4.2 Étude de trois scénarios simulés avec MobiSim-MR

Pour ces trois scénarios, la zone d'étude est la Communauté d'agglomération du Grand Besançon (CAGB)²³ et les communes environnantes, soit 142 communes (Figure 23), toutes faisant partie de l'aire urbaine de Besançon (qui comporte 263 communes) et seulement certaines faisant partie du SCoT (qui comporte 133 communes). L'objectif de la simulation de scénarios prospectifs 2010-2030 est d'étudier l'impact de différentes options d'aménagement (concernant notamment la politique de logement de la Communauté d'agglomération du Grand Besançon) sur l'attractivité résidentielle des communes de la CAGB vis-à-vis des communes environnantes, concurrentes en termes d'attractivité résidentielle. Le scénario RESTRICT consiste en l'application partielle des politiques et aménagements prévus dans les documents de planification (Schéma de cohérence territoriale et Programme local de l'habitat). On imagine pour ce scénario une diminution des capacités à investir des collectivités, qui les empêche de réaliser certains aménagements prévus dans les documents de planification, notamment les haltes ferroviaires de Miserey-Salines, de Portes de Vesoul et la halte de Besançon Ouest (Franois - Hauts-du-Chazal). Le scénario DOCS représente, lui, la mise en œuvre complète des politiques et aménagements prévus dans les documents de planification. Le scénario INDI est une variante du scénario DOCS dans laquelle davantage de maisons individuelles sont construites sur la commune de Besançon.

Figure 23. La zone d'étude : Communauté d'agglomération du Grand Besançon et communes environnantes en 2010.



23 Le périmètre de la Communauté d'agglomération du Grand Besançon est plus large depuis l'été 2016.

Le paramétrage des scénarios²⁴ a été validé et les résultats de simulation discutés dans le cadre de deux ateliers de prospective (tenus les 8 avril 2015 et 22 novembre 2016), qui ont rassemblé une vingtaine d'élus et de techniciens de la commission « Prospective » de la CAGB²⁵. Avant et après chaque atelier, des réunions intermédiaires avec les techniciens (CAGB, Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon, Ville de Besançon) et un groupe restreint d'élus responsables de la commission « Prospective » ont permis de faire avancer les réflexions.

Pour tous les scénarios, les évolutions démographiques simulées entre 2010 et 2030 sont identiques. Elles représentent une augmentation du nombre de ménages plus forte que celle de la population, une augmentation du nombre de célibataires, une augmentation du nombre de familles monoparentales, un vieillissement de la population et une diminution de la taille des ménages (Tableau 22).

Tableau 22. Évolutions démographiques simulées pour les ateliers de prospective avec la Communauté d'agglomération du Grand Besançon, sur le thème de l'attractivité résidentielle.

	1990	2010	2030
Nombre d'habitants	190 258	215 666	243 000
Nombre de ménages	73 148	99 208	121 130
<i>Célibataires</i>	<i>21 720</i>	<i>40 294</i>	<i>62 920</i>
<i>Couples avec enfants</i>	<i>26 240</i>	<i>23 363</i>	<i>20 870</i>
<i>Couples sans enfant</i>	<i>15 368</i>	<i>24 070</i>	<i>23 700</i>
<i>Familles monoparentales</i>	<i>6 036</i>	<i>8 309</i>	<i>10 000</i>

La plupart des autres inputs de simulation sont également identiques : le prix du carburant augmente de façon modérée et régulière ; la configuration socio-spatiale initiale en 2010 comporte la voie de contournement des Mercureaux (ouverte en réalité à la circulation en 2011) ainsi que la halte ferroviaire d'Ecole-Valentin (mise en service en réalité en 2013) ; au début de l'année simulée 2013, le Centre hospitalier universitaire Saint-Jacques (2300 emplois) et la faculté de médecine (5200 étudiants) localisés au centre-ville de Besançon sont déplacés au quartier des Hauts-du-Chazal ; au début de l'année simulée 2015, le tramway est introduit, accompagné de la modification afférente du réseau de bus ; au début de l'année simulée 2017, presque 800 emplois administratifs, disséminés dans la commune de Besançon, sont rassemblés sur le site de la gare Viotte située au centre-ville de Besançon. Concernant les variables de contexte, la distribution des tailles des nouveaux logements construits par simulation est la suivante : parmi les appartements, 1 % comportent une pièce, 20% comportent deux pièces, 56% comportent trois pièces, 16% comportent quatre pièces et 7% comportent cinq pièces ou davantage ; les maisons comportent toutes cinq pièces ou davantage. Le développement résidentiel simulé est dense localement et suit une logique d'organisation spatiale fractale (les inputs de simulation avec le modèle MobiSim-DR intègrent une carte d'intérêt des cellules de 20 m. de côté à être urbanisées issue de MUP-City). La plupart des zones non

24 Ce paramétrage a été effectué en partie dans le cadre du chantier "Construction de l'espace urbain et périurbain" du projet ODIT (Observatoire des dynamiques industrielles et territoriales) de la Maison des sciences de l'homme et de l'environnement CN Ledoux, financé par le Fond Européen de Développement Régional (2012-2015).

25 L'organisation de ces ateliers s'est faite dans le cadre du projet ICONE (2014-2016), mené au laboratoire ThéMA.

urbanisables sont identiques : zones non constructibles dans le plan local d'urbanisme (PLU) de la Ville de Besançon, surfaces artificialisées, zones tampons autour des emprises des voies ferrées et des routes, zones de pente supérieure à 15 %, surfaces en eau, zones inondables du Doubs, de l'Ognon et de la Loue, zones naturelles d'intérêt écologique et faunistique (ZNIEFF) de type 1, zones humides. Hors CAGB, 345 nouveaux logements sont construits chaque année de simulation (Tableaux 23 et 24).

Tableau 23. Nombre de logements construits par simulation

	Scénario RESTRICT	Scénario DOCS
Total zone d'étude	1310 (38% de maisons et 62% d'appartements)	1445 (40% de maisons et 60% d'appartements)
Besançon	560 (1% de maisons et 99% d'appartements)	745 (14% de maisons et 86% d'appartements)
CAGB hors Besançon	405 Dans chaque commune, le nombre de nouveaux logements construits est égal au nombre annuel de logements construits entre 2007 et 2011 (source : INSEE, Recensement de la population). Répartition par types : Très petites communes : 100% individuel. Petites communes : 90% individuel. Communes moyennes : 86% individuel. Communes moyennes « pro-HLM » : 80% individuel.	355 Application stricte des préconisations de construction du PLH
Hors CAGB	345 Dans chaque commune, le nombre de nouveaux logements construits de chaque type est celui des données de recensement de la population INSEE 2007 et 2011.	

Tableau 24. Caractéristiques des logements construits par simulation (répartition en %).

Type de logement	Statut d'occupation	Scénario RESTRICT	Scénario DOCS
Maisons individuelle	Propriétaire-occupant	51	31
	Locataire privé	19	9
	Locataire social	3	1
Appartements	Propriétaire-occupant	14	22
	Locataire privé	11	22
	Locataire social	2	16

Pour le scénario RESTRICT, la politique de logement simulée à Besançon est davantage active qu'elle ne l'a été dans le passé, tout en étant moins active que celle prévue dans le PLH (Programme local de l'habitat). La quantité de nouveaux logements construits par simulation dans la commune de Besançon est assez importante, au-dessus de la tendance générale de la construction de logements observée, qui se situe plutôt autour de 350-400 logements par an. Par ailleurs, le scénario RESTRICT minimise, au regard des tendances de construction actuelles, la part de petits logements

nouvellement construits au profit des logements de taille moyenne et grande. La localisation du développement résidentiel simulé à l'échelle locale privilégie la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, au bâti existant (tout en préservant l'ouverture du bâti sur les espaces non bâtis environnants) et aux routes, ces différents critères de localisation ayant le même poids dans la simulation.

Pour le scénario DOCS, trois nouvelles haltes ferroviaires (Miserey-Salines, Portes de Vesoul et Hauts-du-Chazal) sont ajoutées en 2015. Le nombre de logements construits par simulation est moins élevé que dans le scénario RESTRICT dans les communes périurbaines de l'agglomération et plus élevé dans la commune de Besançon. Les secteurs d'opération de maîtrise publique de la Ville de Besançon (les Planches-Relançon, Les Vaîtes, Vauban, Rodia) et une zone à proximité de l'arrêt de tram Rosemont sont ouverts à l'urbanisation quand bien même ces emplacements sont mentionnés comme étant non constructibles dans le PLU. La localisation du développement résidentiel simulé à l'échelle locale privilégie la proximité aux commerces et services de fréquentation quotidienne et hebdomadaire, au bâti existant, aux routes, comme dans le scénario RESTRICT, mais aussi aux stations de TER présentes en 2011 (pour la période de simulation 2010-2014) et en 2015 (pour la période de simulation 2015-2025).

Pour ce qui est du scénario INDI, parmi les nouveaux logements construits chaque année de simulation sur la commune de Besançon, 33% sont des maisons individuelles (contre 14% pour le scénario DOCS).

En 2025, pour une moyenne de dix répliques de chaque simulation, la CAGB compte 99 035 ménages avec le scénario RESTRICT contre respectivement 99 980 et 99 970 ménages avec les scénarios DOCS et INDI. Sur le total de nombre de ménages, les scénarios DOCS et INDI sont donc plus intéressants que le scénario RESTRICT pour la CAGB et la différence entre les scénarios DOCS et INDI n'est pas significative. Dans tous les cas, les trois secteurs de la zone d'étude voient leur nombre de ménages augmenter (Figure 24). Dans les secteurs périurbains (appartenant ou non à la CAGB), l'augmentation est plus forte avec le scénario RESTRICT qu'avec les scénarios DOCS et INDI. Inversement, pour la commune de Besançon, le nombre de ménages augmente davantage avec les scénarios DOCS et INDI qu'avec le scénario RESTRICT. En nombre de ménages en 2025 à Besançon, la différence entre les scénarios DOCS et INDI n'est pas significative. Cependant, elle est significative au regard du nombre de ménages de moins de 45 ans avec enfant(s), plus élevé avec le scénario INDI (Figure 25).

Figure 24. Evolution 2010-2026 du nombre de ménages par secteur dans la Communauté d'agglomération du Grand Besançon et alentours. Résultats de simulation obtenus avec MobiSim. Moyenne de 10 répliques de chaque simulation. NB : les graduations des axes des ordonnées diffèrent selon les graphiques.

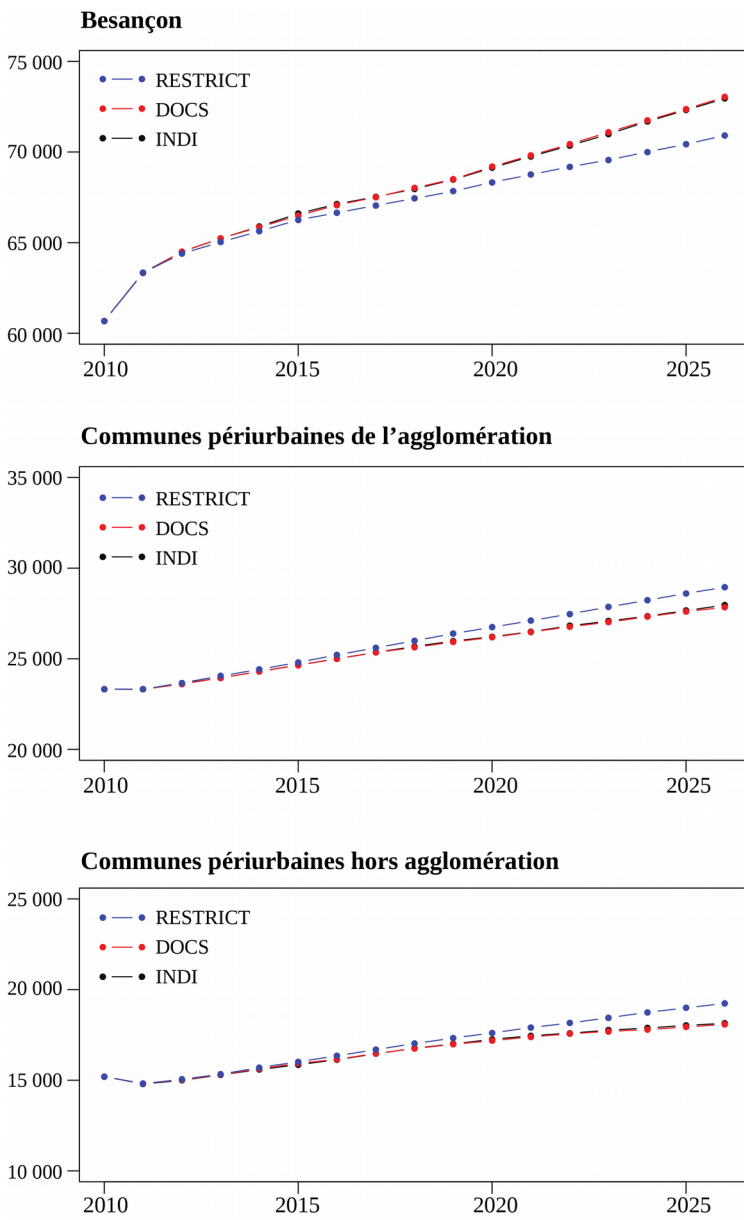


Figure 25. Evolution 2010-2026 du nombre de ménages de moins de 45 ans avec enfant(s), par secteur, dans la Communauté d'agglomération du Grand Besançon et alentours. Résultats de simulation obtenus avec MobiSim. Moyenne de 10 répliques de chaque simulation. NB : les graduations des axes des ordonnées diffèrent selon les graphiques.

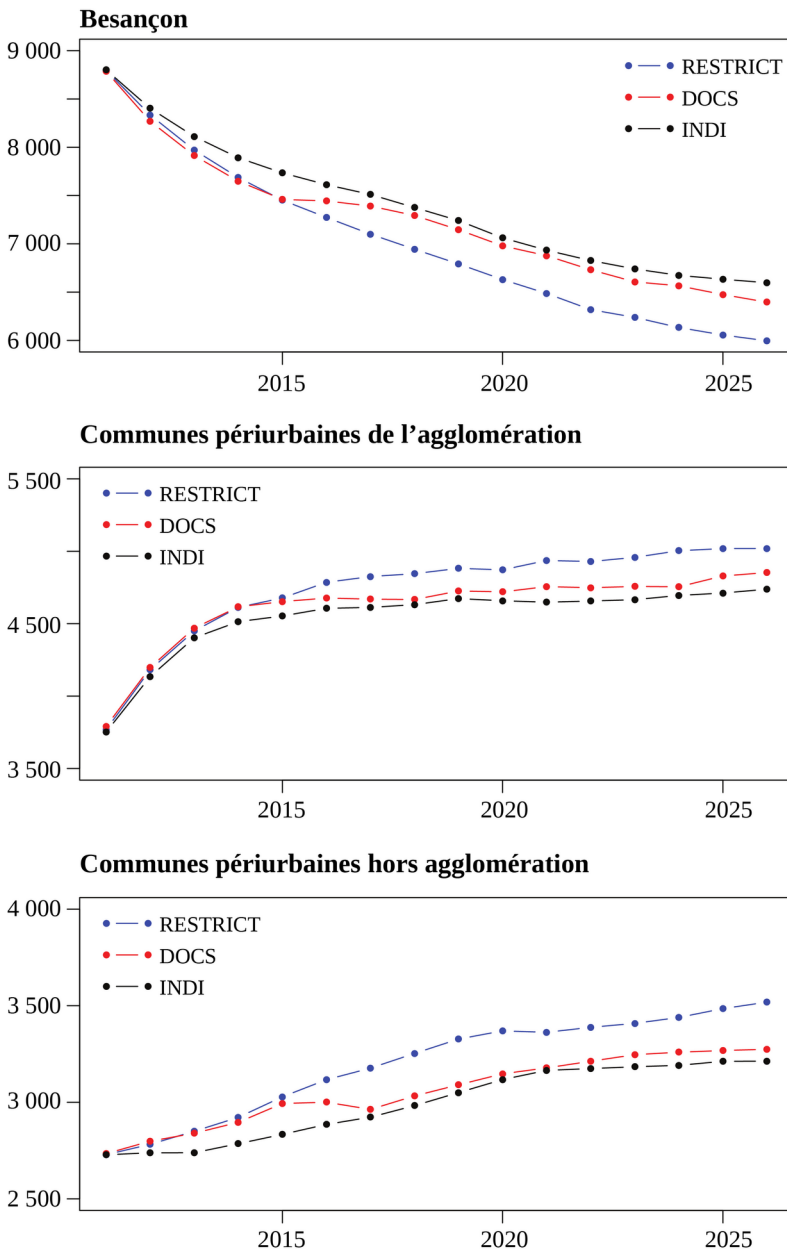
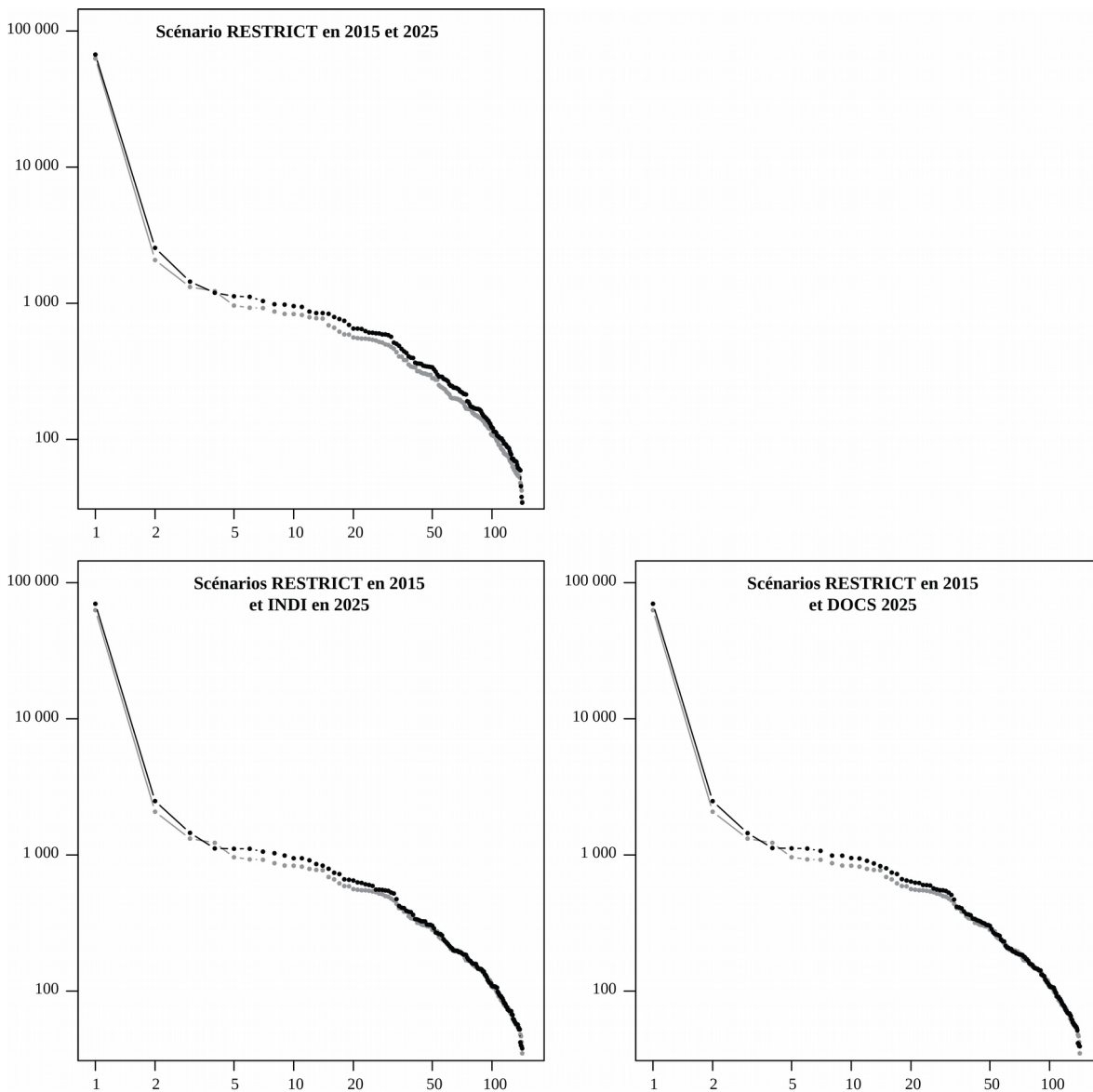


Figure 26. Distributions rang-taille du nombre de ménages par commune pour l'aire urbaine de Besançon pour le scénario RESTRICT en 2015 (en gris) et pour les scénarios RESTRICT, DOCS et INDI en 2025 (en noir), obtenues par simulation avec la plateforme MobiSim. En abscisse : le rang de chaque commune ; en ordonnée : son nombre de ménages. Valeurs moyennes de dix répliques de chaque simulation.

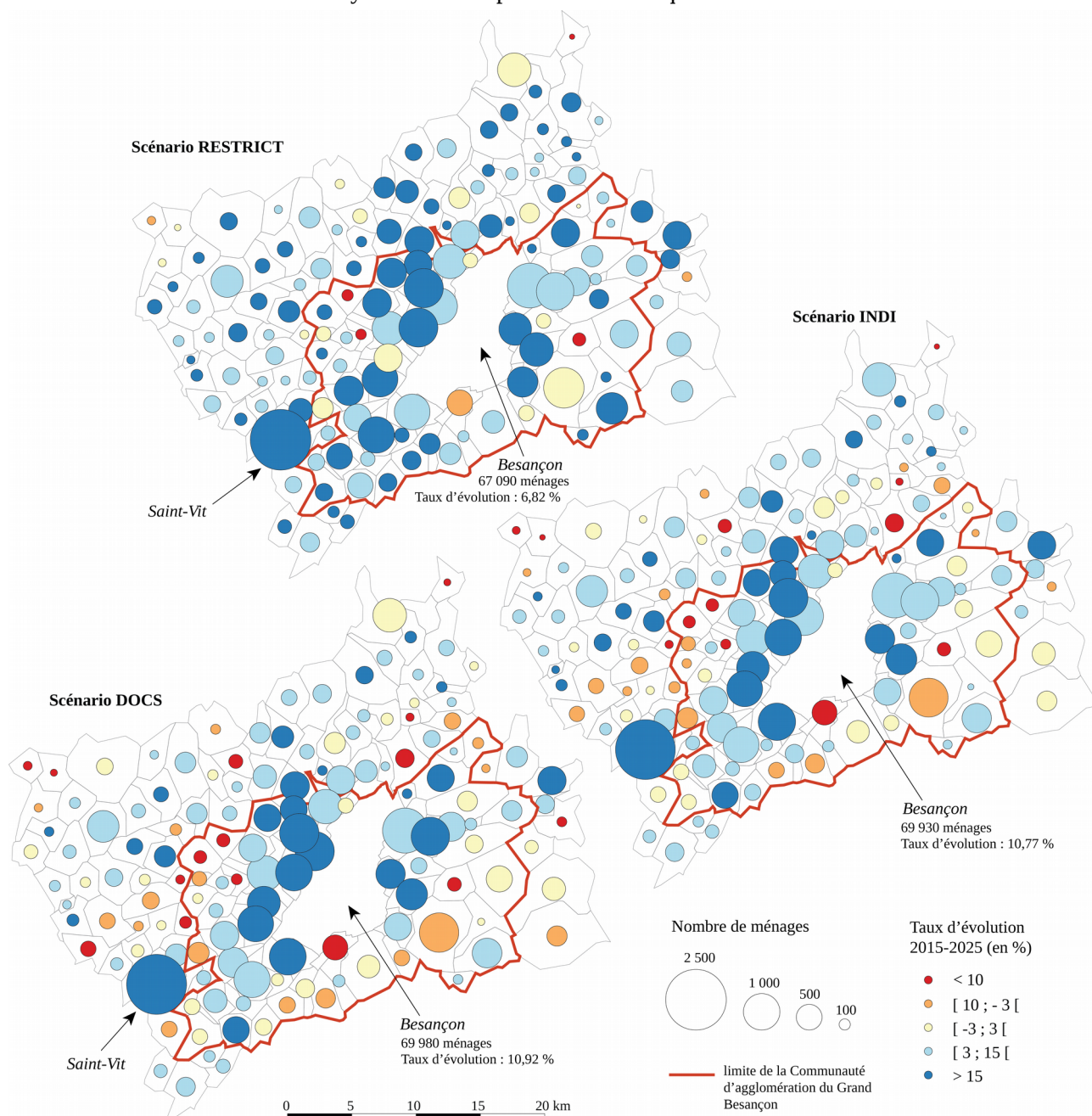


L'analyse des distributions rang-taille du nombre de ménages par commune, unité de peuplement d'intérêt pour les aménageurs, montre qu'avec le scénario RESTRICT, toutes les communes gagnent des ménages alors qu'avec les scénarios DOCS et INDI, seules les communes les plus peuplées voient leur nombre de ménages augmenter (Figure 26). On n'observe pas de différence de distribution entre les scénarios DOCS et INDI.

Les cartes au niveau communal (Figure 27) confirment et précisent les observations des distributions rang-taille. Avec le scénario RESTRICT, le nombre de ménages augmente dans quasiment toutes les communes tandis qu'avec les scénarios DOCS et INDI, un nombre important de communes périurbaines, majoritairement des communes de petite taille, voient leur nombre de ménages diminuer. Ces communes sont localisées autant dans la CAGB que hors CAGB. En revanche, les communes périurbaines les plus grandes, qui appartiennent majoritairement à la

CAGB, connaissent les mêmes évolutions positives de leur nombre de ménages avec les trois scénarios. On observe peu de différence entre les scénarios DOCS et INDI : les taux d'évolution du scénario DOCS sont inférieurs à ceux du scénario INDI pour certaines petites communes (localisées dans et hors CAGB) et supérieurs pour certaines communes plus grandes appartenant à la CAGB.

Figure 27. Nombre de ménages dans les communes périurbaines en 2025 et taux d'évolution 2015-2025 pour trois scénarios prospectifs simulés avec MobiSim pour la Communauté d'agglomération du Grand Besançon et les communes avoisinantes. Moyenne de 10 répliques de chaque simulation.



Le solde migratoire de la commune de Besançon est davantage positif avec le scénario RESTRICT qu'avec les autres scénarios (Figure 28). En effet, moins de ménages quittent Besançon pour aller en périurbain CAGB et hors CAGB et davantage de ménages arrivent à Besançon en provenance des communes périurbaines CAGB ou hors CAGB (Figure 29). Malgré cela, la croissance du nombre de ménages à Besançon est plus forte avec les scénarios DOCS et INDI qu'avec le scénario RESTRICT. Cette croissance plus forte s'explique donc par la création de nouveaux ménages à partir de ménages existants (décohabitations parentales, séparations de ménages), au sein même de la commune. Pour les communes périurbaines de la CAGB, les scénarios DOCS et INDI sont intéressants en termes de flux migratoires (solde migratoire quasi nul), ce qui n'est pas le cas avec le scénario RESTRICT (solde migratoire négatif) : avec les scénarios DOCS et INDI, moins de ménages quittent les communes périurbaines de la CAGB et davantage de ménages arrivent depuis Besançon. En revanche, le nombre de ménages qui arrivent depuis les communes hors CAGB est un peu moins élevé qu'avec le scénario RESTRICT.

Figure 28. Soldes migratoires annuels simulés avec MobiSim pour trois scénarios prospectifs (Communauté d'agglomération du Grand Besançon et communes environnantes). Moyenne de 10 réplifications de chaque simulation.

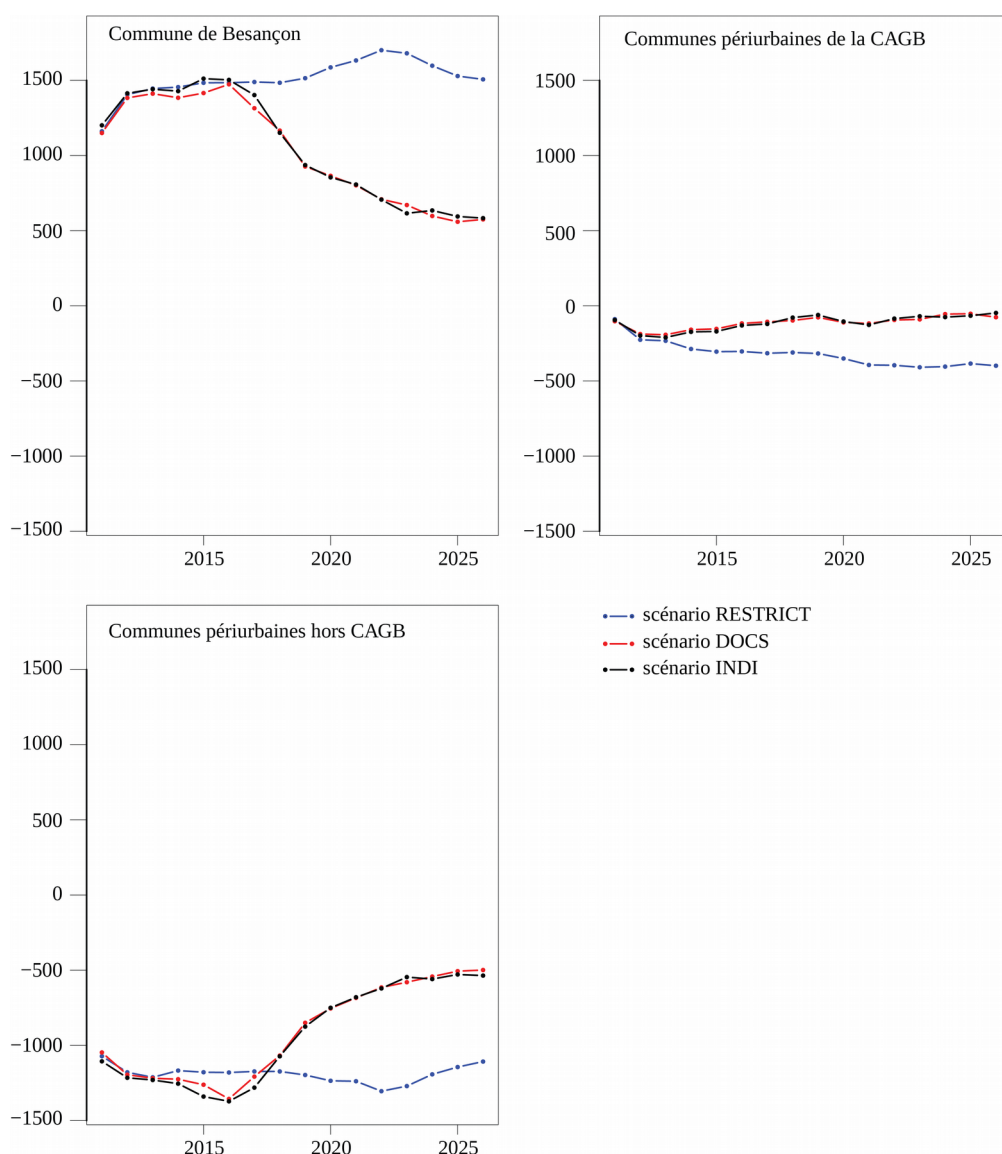
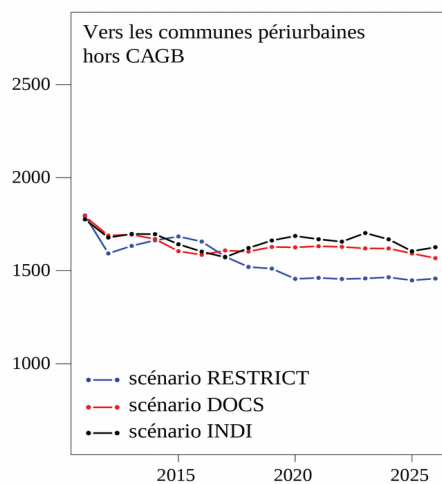
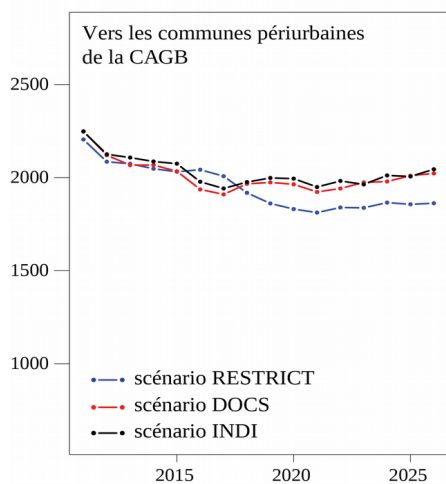
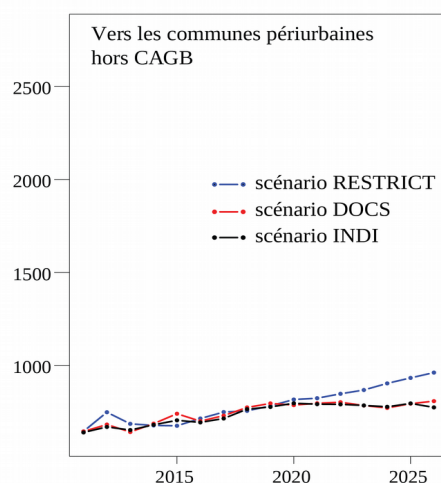
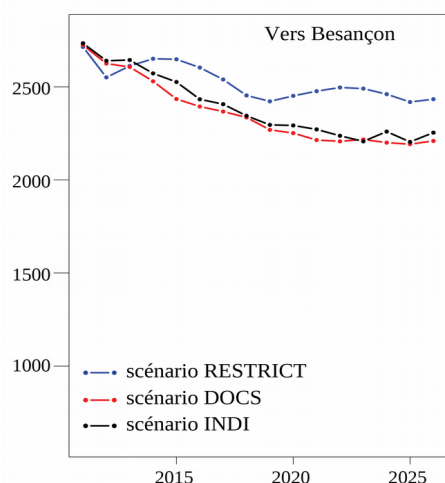


Figure 29. Nombres annuels de migrants simulés avec MobiSim pour trois scénarios prospectifs (Communauté d'agglomération du Grand Besançon et communes environnantes). Moyenne de 10 répliquations de chaque simulation.

Au départ de Besançon



Au départ des communes périurbaines de la CAGB



Au départ des communes périurbaines hors CAGB

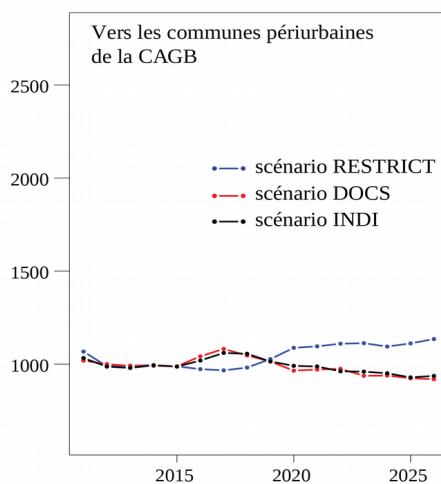
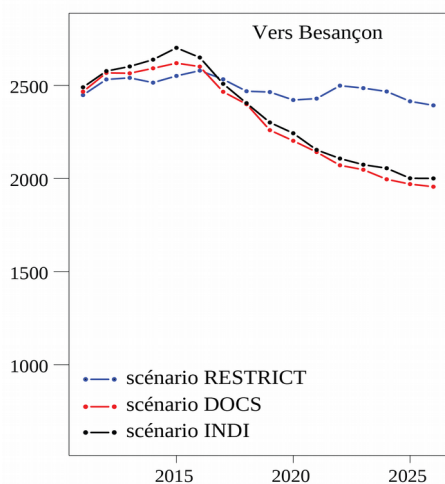
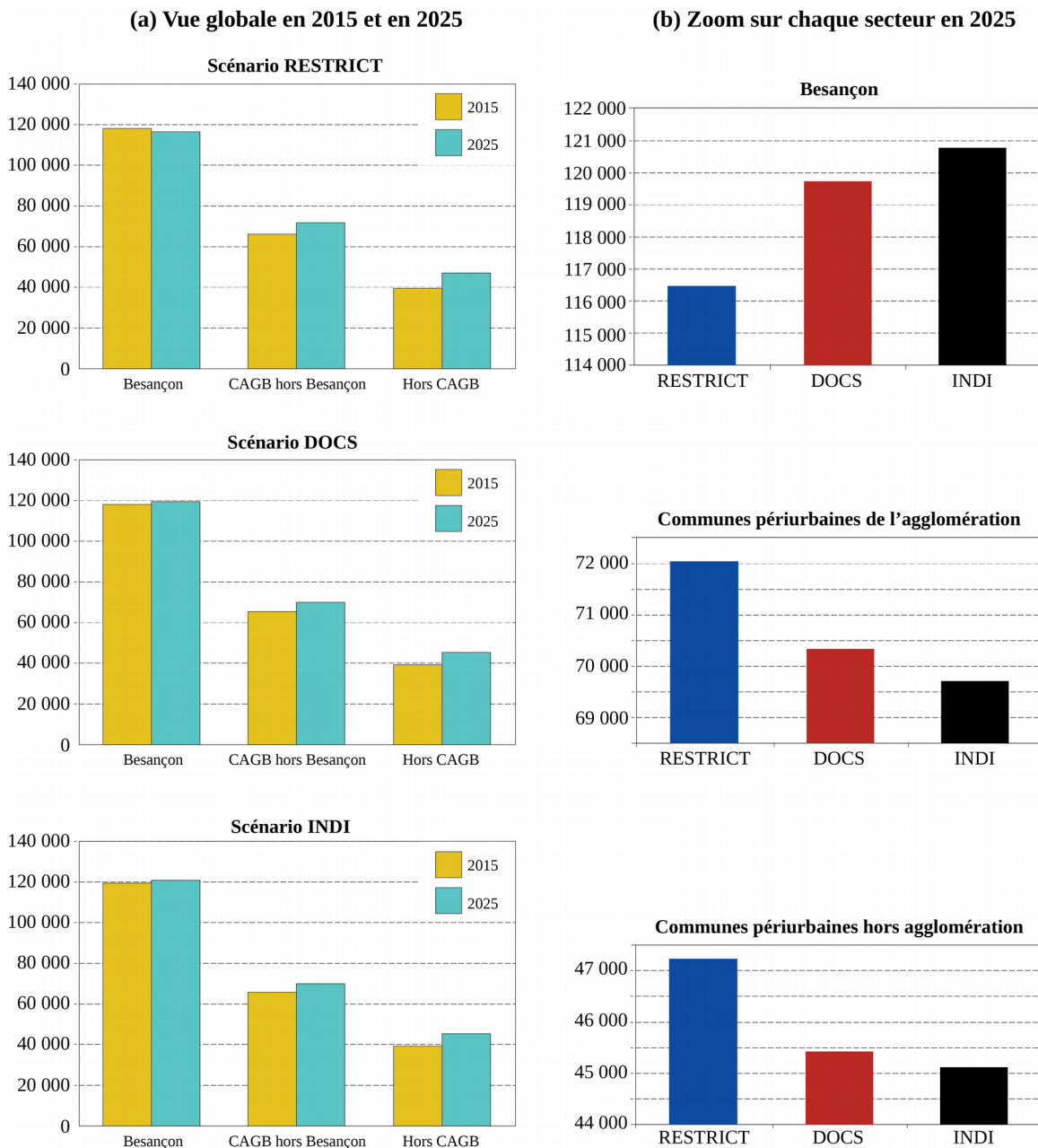


Figure 30. Nombre d'habitants par secteur dans la Communauté d'agglomération du Grand Besançon et alentours. Résultats de simulation obtenus avec MobiSim. Moyenne de 10 réplifications de chaque simulation. NB : les graduations des axes des ordonnées diffèrent selon les graphiques.



En nombre d'habitants, les tendances sont identiques à celles observées considérant le nombre de ménages au niveau macro-géographique. En 2025, pour une moyenne de dix réplifications de chaque simulation, la CAGB compte 188 490 habitants avec le scénario RESTRICT contre respectivement 190 060 et 190 450 habitants avec les scénarios DOCS et INDI.

En revanche, au niveau des trois secteurs de la zone d'étude, les tendances sont différentes de celles observées considérant le nombre de ménages. D'une part, la commune de Besançon perd des

habitants avec le scénario RESTRICT tandis qu'elle en gagne avec les scénarios DOCS et INDI²⁶ (Figure 30a). D'autre part, la commune de Besançon compte environ mille habitants de plus en 2025 avec le scénario INDI qu'avec le scénario DOCS, tandis que les communes périurbaines de la CAGB comptent quelques centaines d'habitants de moins (Figure 30b).

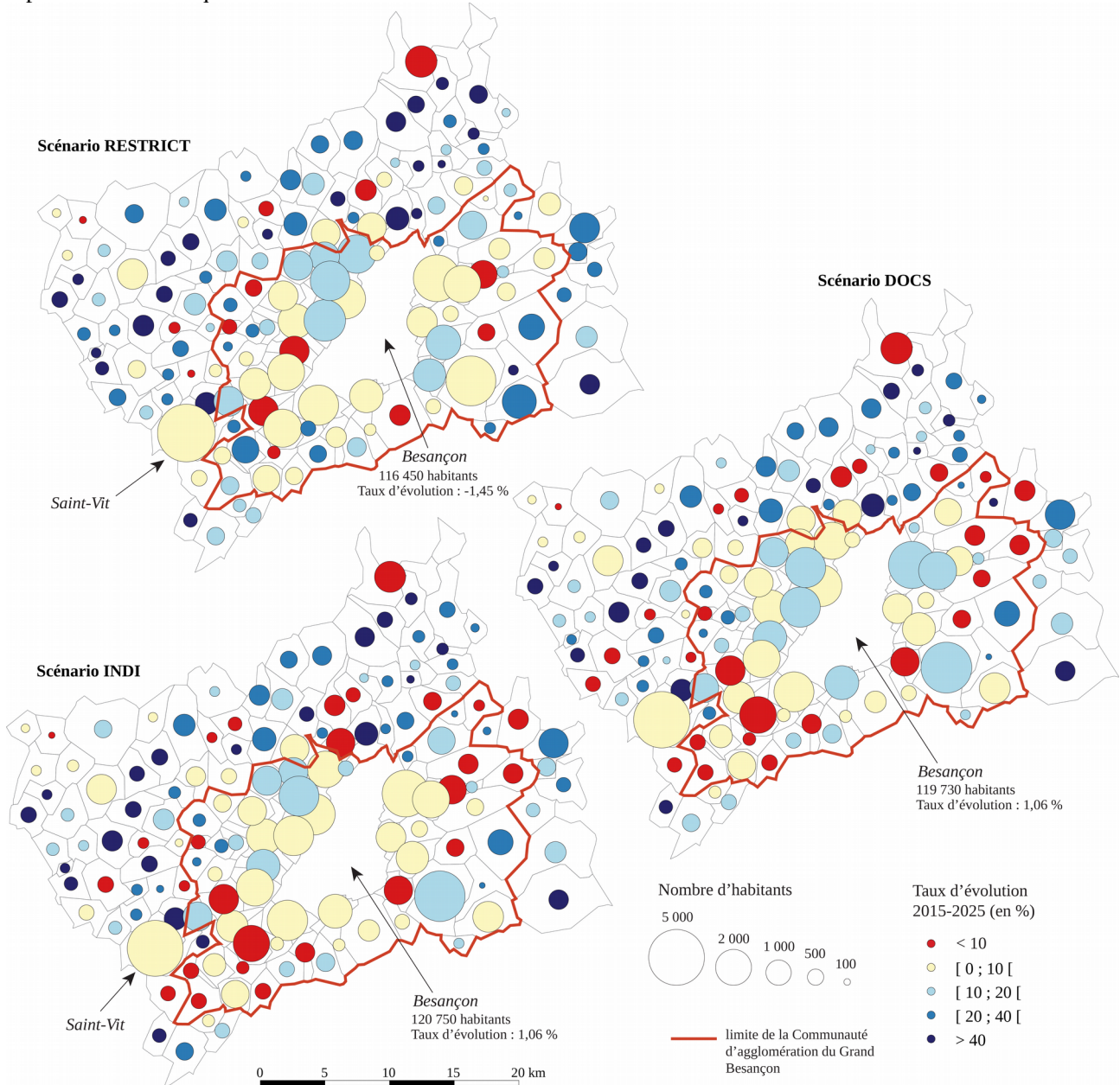
L'analyse au niveau méso-géographique montre une différenciation nette des communes périurbaines selon qu'elles appartiennent ou pas à la CAGB (Figure 31). En effet, les communes comptant le plus d'habitants, dont la plupart appartiennent à la CAGB, ont en général des taux d'évolution inférieurs à ceux des petites communes. Avec le scénario RESTRICT, bon nombre de communes périurbaines ont des taux d'évolution davantage positifs qu'avec les scénarios DOCS et INDI. On dénombre huit communes en décroissance dans la CAGB et six communes hors CAGB avec le scénario RESTRICT contre quatorze dans la CAGB et douze hors CAGB avec les scénarios DOCS et INDI. Ces derniers se différencient très peu l'un de l'autre.

Le bilan, en termes d'attractivité résidentielle de la CAGB, est que les scénarios DOCS et INDI sont plus intéressants que le scénario RESTRICT considérant le nombre total de ménages et d'habitants de la CAGB. Ces deux scénarios permettent aussi d'éviter une diminution du nombre d'habitants dans la commune Besançon moyennant une moindre augmentation du nombre d'habitants dans le secteur périurbain de la CAGB (au niveau communal, seules les plus grandes communes périurbaines de la CAGB connaissent une augmentation de leur nombre de ménages avec ces deux scénarios tandis que les plus petites communes voient leur nombre de ménages diminuer). Les scénarios DOCS et INDI permettent en outre moindre diminution du nombre de ménages de moins de 45 ans à Besançon avec enfants tout en maintenant ce nombre en périurbain de la CAGB.

La différence entre les scénarios DOCS et INDI n'est pas significative pour les communes périurbaines de la CAGB. En nombre absolu, elle semble l'être pour la commune de Besançon, le scénario INDI apparaissant plus intéressant que le scénario DOCS. Cependant, cette différence n'est pas significative au vu des taux d'évolution du nombre de ménages et d'habitants, identiques pour les deux scénarios.

26 Une explication l'augmentation du nombre d'individus à Besançon avec le scénario DOCS et encore davantage avec le scénario INDI est le fait que, parmi les ménages qui passent, en cours de simulation, du statut de -45 ans sans enfant au statut de -45 ans avec enfant(s), davantage restent dans la commune de Besançon au lieu d'aller en périurbain.

Figure 31. Population communale pour trois scénarios prospectifs 2010-2025 simulés avec MobiSim (Communauté d'agglomération du Grand Besançon et communes environnantes). Moyenne de 10 réplifications de chaque simulation.



4.3 Étude d'un scénario simulé avec SimFeodal

Le scénario simulé représente l'évolution du peuplement rural du diocèse de Tours entre 800 et 1100. Les valeurs des inputs et variables de contexte sont données dans le tableau 16 (section 3.2). L'espace modélisé est un carré de 100 kilomètres de côté, représentant de manière simplifiée la zone d'étude. L'espace de modélisation est considéré comme homogène, c'est-à-dire qu'on ne représente aucun élément naturel pouvant influencer les dynamiques de peuplement, qu'il s'agisse du relief, de cours d'eau, de zones littorales, d'un couvert végétal ou de gisements de ressources ; il s'agit

d'éliminer toute interférence susceptible de se surajouter aux processus que l'on souhaite expérimenter. Des agglomérations secondaires d'origine antique et de dimension régionale sont présentes à l'initialisation, ainsi qu'une vingtaine de villages. L'existence de pôles urbains, en particulier la cité de Tours, n'est pas modélisée.

En 800, la plupart des foyers paysans sont dispersés aléatoirement dans l'espace modélisé. Le nombre de foyers paysans est stable, arbitrairement fixé à 4 000. Ces foyers correspondent à des groupes de quatre à cinq personnes, soit un espace peuplé de 16 à 20 000 habitants, c'est-à-dire une densité moyenne assez faible de l'ordre de 1,6 à 2 habitants par km². Au cours d'une simulation, la population se renouvelle partiellement, c'est-à-dire qu'à chaque pas de temps, une partie des foyers paysans (5 %, soit 200) disparaît et le même nombre de foyers paysans apparaît. Les foyers paysans apparaissant en cours de simulation sont placés dans un agrégat choisi suivant un tirage aléatoire pondéré par le nombre de foyers paysans présents dans chaque agrégat. Ce faisant, les foyers paysans concernés ont davantage de chances de se localiser dans un agrégat de grande taille plutôt que dans un agrégat de petite taille. On compte deux grands seigneurs (les comtes d'Anjou et de Blois) et 18 petits seigneurs en 800. De nouveaux petits seigneurs apparaissent peu à peu en cours de simulation et viennent s'ajouter à ceux initialement présents. A leur création, ils ont uniquement des droits banaux, ou des droits de basse et moyenne justice qui s'appliquent à quelques foyers paysans dans leur voisinage. En 800, de nombreuses églises sont présentes, réparties de manière aléatoire dans l'espace du modèle. Certaines possèdent le droit de baptême et sont donc considérées comme églises paroissiales. Les églises non paroissiales constituent une réserve d'édifices susceptibles de se voir doter de droits paroissiaux en cours de simulation.

Figure 32. Evolution de la part de foyers paysans isolés résultant d'une simulation avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt réplifications d'une même simulation.

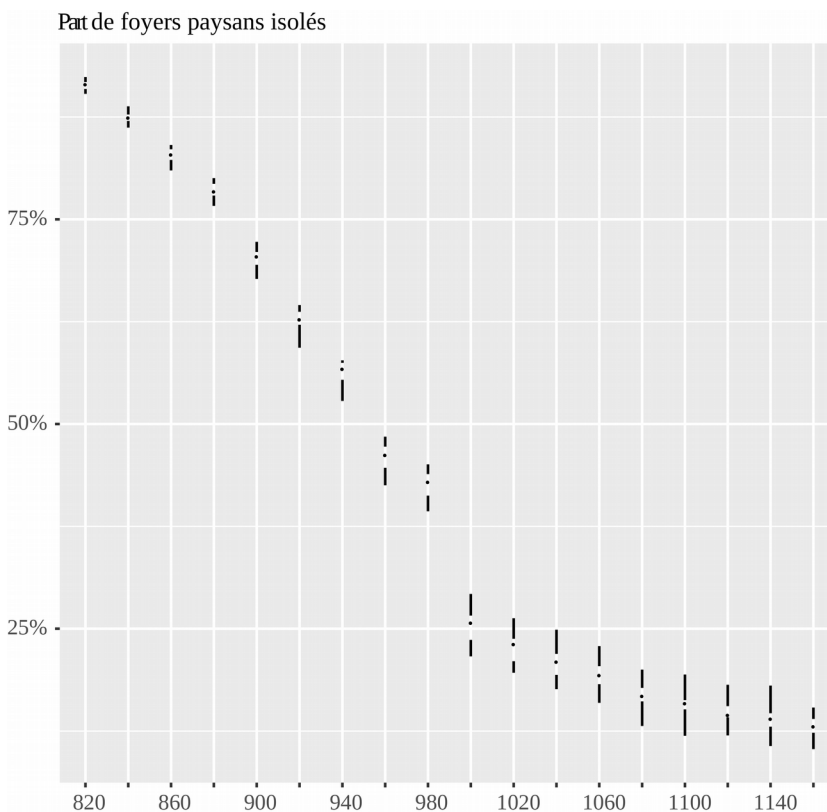


Figure 33. Evolution du nombre de pôles d'attraction créés par simulation avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt réplifications d'une même simulation.

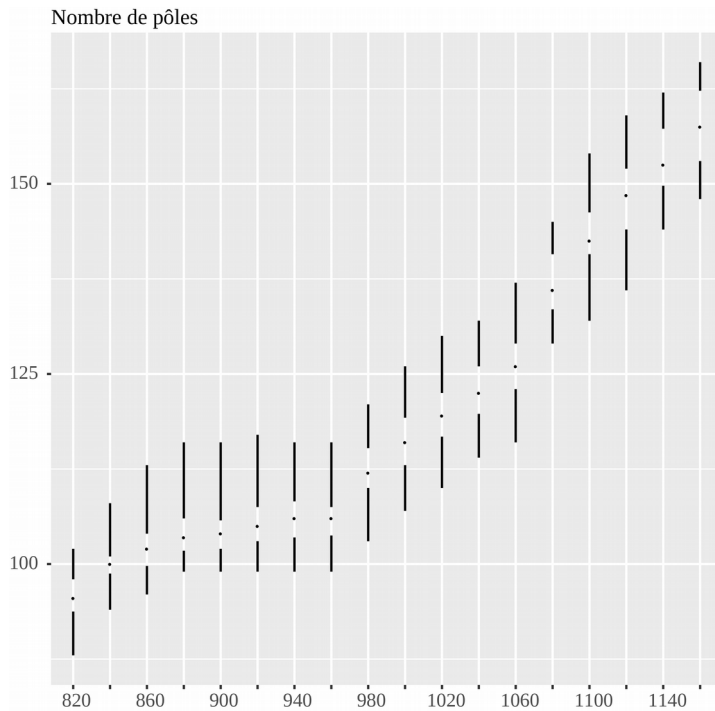
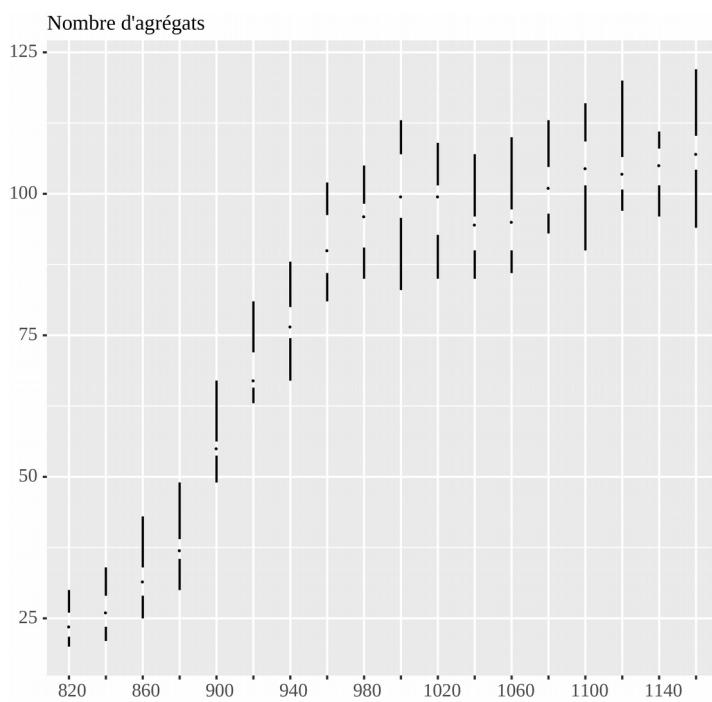
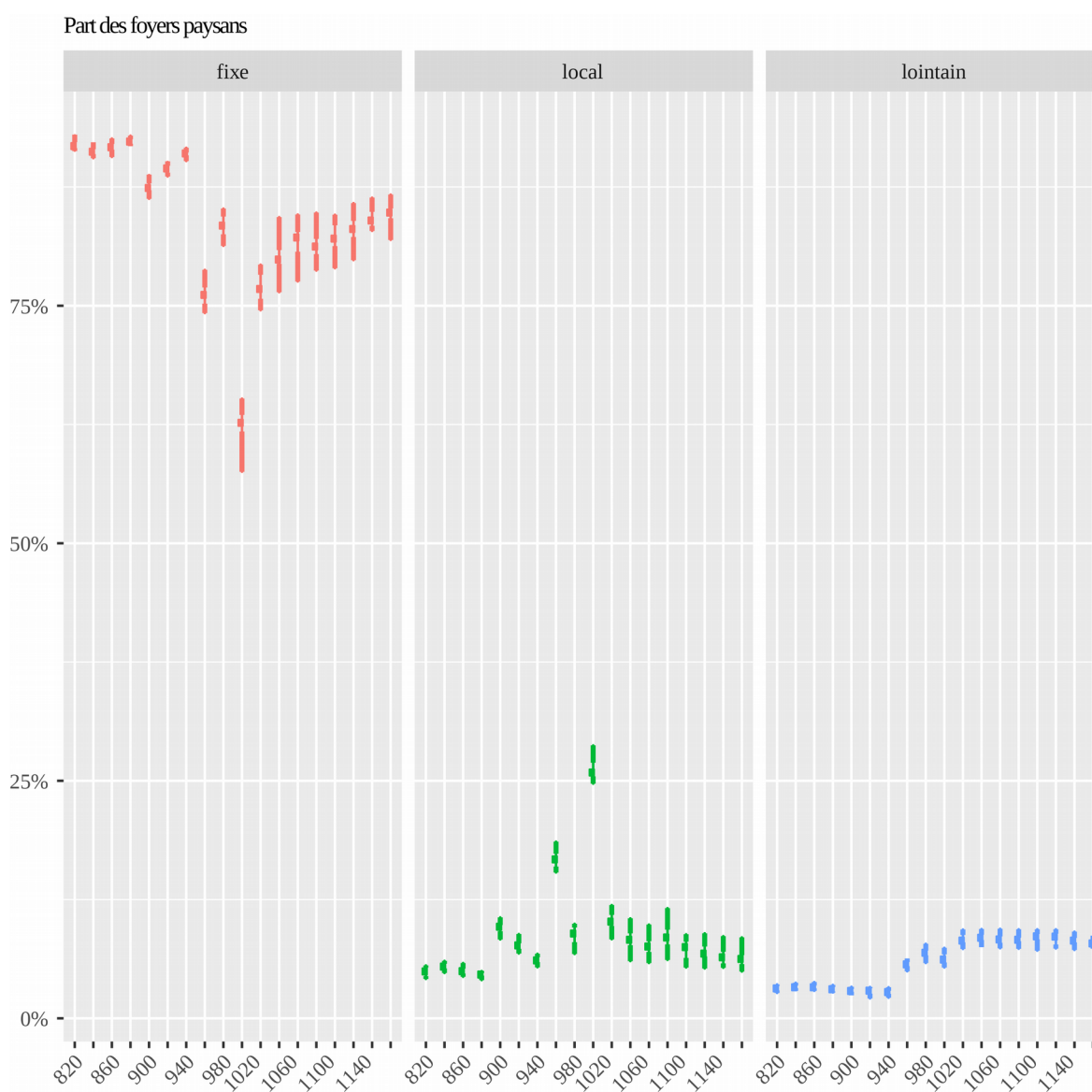


Figure 34. Evolution du nombre d'agrégats de foyers paysans créés par simulation avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt réplifications d'une même simulation.



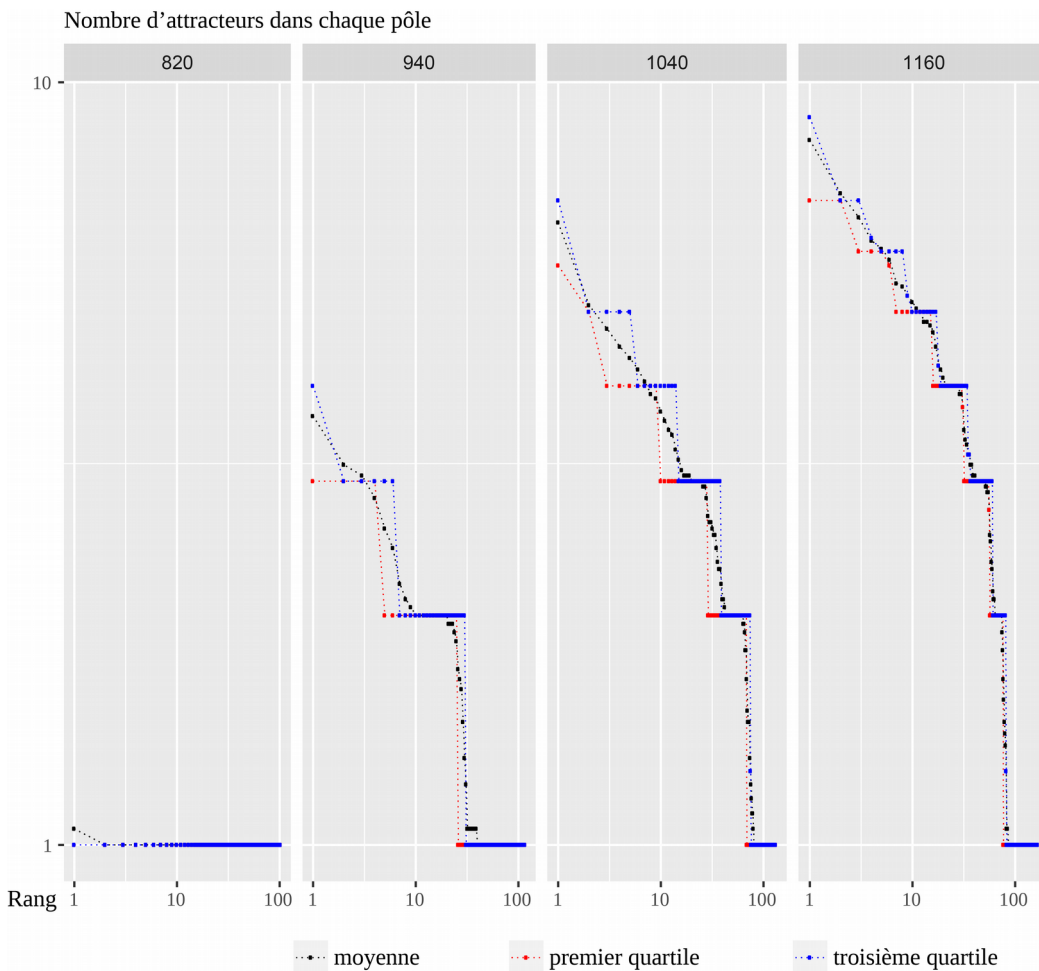
Le modèle SimFeodal, paramétré pour la Touraine, simule une implantation préférentielle croissante des foyers paysans au sein d'agrégats de population. Ce faisant le nombre de foyers paysans isolés, c'est-à-dire localisés en-dehors d'un agrégat, diminue au cours du temps (Figure 32). Les foyers paysans se concentrent préférentiellement autour de pôles d'attraction, dont le nombre augmente au fur et à mesure de la création de châteaux, d'églises paroissiales et de communautés villageoises (Figure 33). La multiplication des pôles dans l'espace modélisé entraîne une dispersion spatiale de la création d'agrégats par les foyers paysans et donc, une augmentation du nombre d'agrégats (Figure 34).

Figure 35. Evolution de la proportion de foyers paysans se déplaçant localement ou bien à de plus longues distance ou bien ne se déplaçant pas. Simulation effectuée avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt répliques d'une même simulation.



En début de période de simulation, les foyers paysans se déplacent assez peu (Figure 35)²⁷ car relativement peu d'entre eux trouvent un pôle suffisamment attractif vers lequel se déplacer. En milieu de période de simulation, on constate une forte augmentation du nombre de déplacements locaux (ainsi qu'une petite augmentation du nombre de déplacements lointains), résultant de l'augmentation du nombre de pôles d'attraction et surtout, de l'attractivité de ceux-ci (Figure 36). En effet, dans le modèle, quand un foyer paysan est localisé dans un agrégat, soit il y reste, soit il le quitte pour un agrégat davantage attractif. En fin de période de simulation, le nombre de déplacements locaux diminue car la majorité des foyers paysans sont localisés dans l'agrégat le plus attractif localement. En revanche, le nombre de déplacements lointains continue d'augmenter en réponse à l'insatisfaction persistante de nombreux foyers paysans.

Figure 36. Evolution de la distribution rang-taille des pôles d'attraction obtenus par simulation avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Vingt réplifications d'une même simulation.



Le processus de concentration des foyers paysans autour des pôles d'attraction favorise le développement de certains agrégats plus que d'autres. En début de simulation, les seuls attracteurs existants sont les églises paroissiales, réparties aléatoirement dans l'espace. L'émergence de petits

²⁷ N'est pas modélisé le fait qu'aux alentours de l'an 800, les unités d'exploitation isolées pouvaient se déplacer au bout d'un siècle ou deux sur une distance de quelques dizaines ou quelques centaines de mètres.

agrégats de foyers paysans se produit préférentiellement autour d'elles (Figure 37). Ensuite, au fil de la simulation, chaque agrégat peut connaître la création d'une communauté villageoise, ce qui renforce son attractivité vis-à-vis des foyers paysans. Les agrégats possédant à la fois une église paroissiale et une communauté ont un pouvoir d'attraction sur les foyers paysans plus fort que les autres agrégats et, par conséquent, ont davantage de chance de se développer. La création de châteaux est plus fréquente dans les agrégats existants qu'en dehors des agrégats. L'attraction des agrégats les plus attractifs est d'autant renforcée par l'arrivée d'un château. Qui plus est, la présence d'un grand nombre de foyers paysans dans un agrégat entraîne la création de nouvelles églises paroissiales en son sein (Figure 38), ce qui renforce encore l'attractivité de cet agrégat.

Figure 37. Evolution du nombre et de la proportion d'agrégats de foyers paysans possédant au moins une église paroissiale. Simulation effectuée avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt réplifications d'une même simulation.

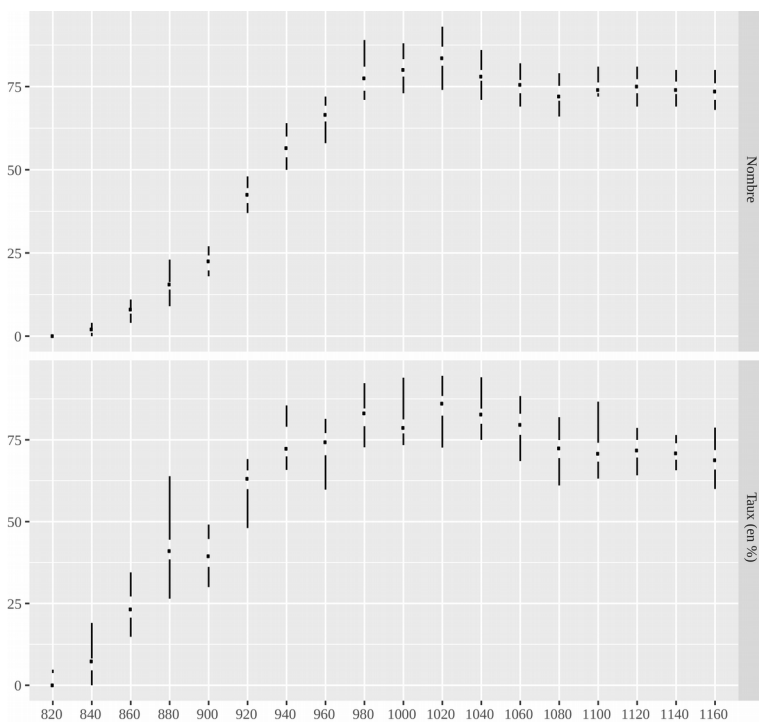


Figure 38. Nombre d'églises paroissiales créées à chaque pas de simulation dans un agrégat de foyers paysans. Simulation effectuée avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Valeur moyenne, 1^{er} et 3^{ème} quartiles pour vingt réplifications d'une même simulation.

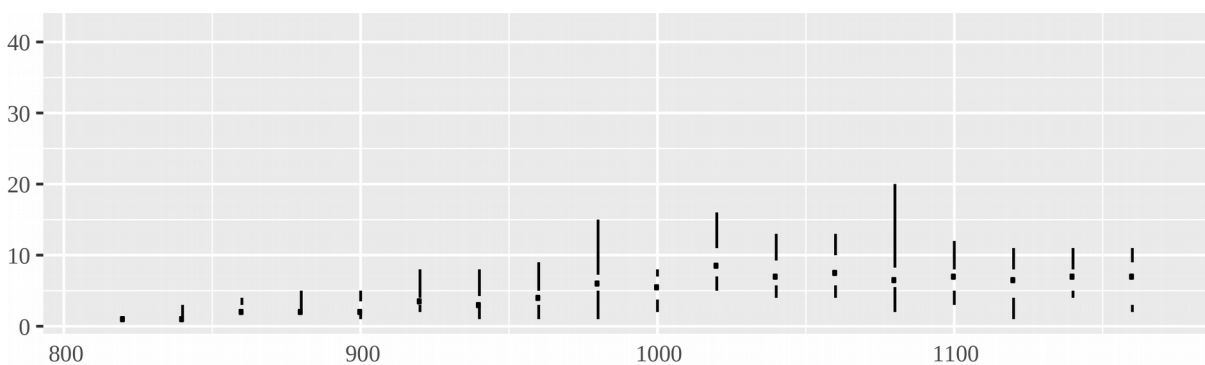
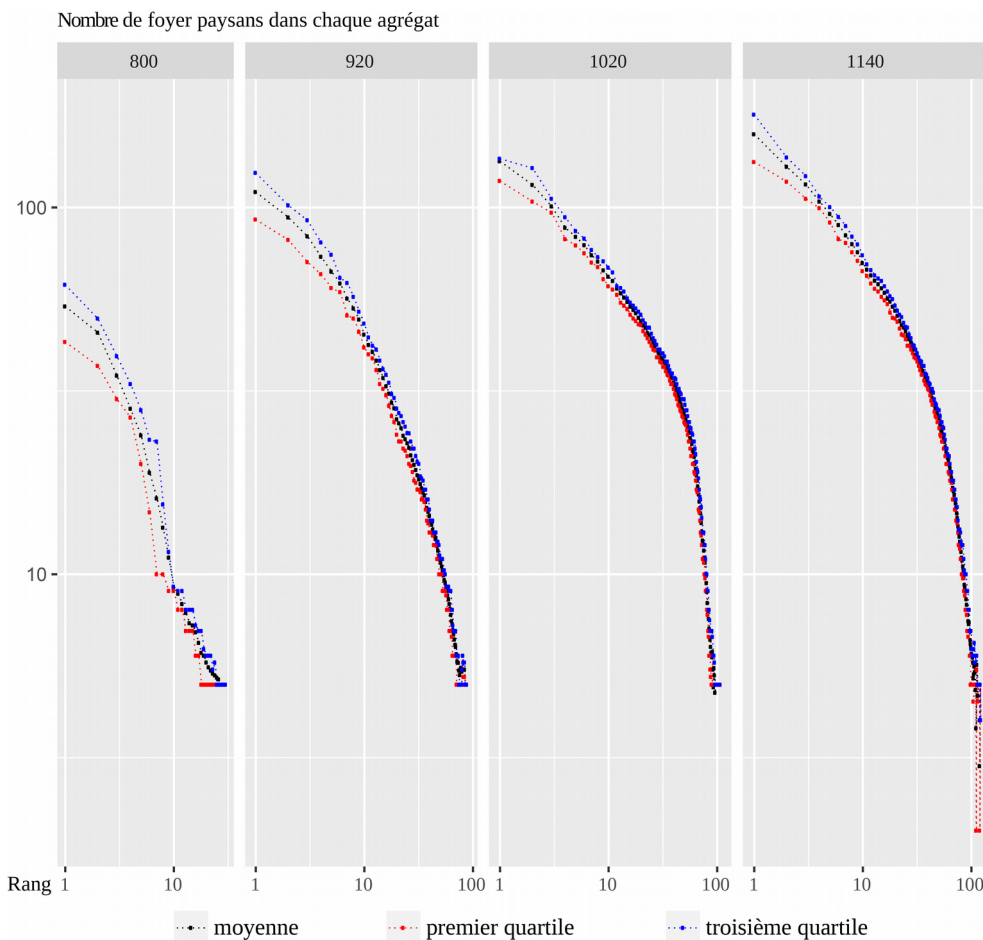


Figure 39. Evolution de la distribution rang-taille des agrégats de foyers paysans obtenus par simulation avec le modèle SimFeodal (version 4.5) pour la Touraine entre 800 et 1140. Vingt répliques d'une même simulation.



Au final, la combinaison de ces différents processus entraîne la hiérarchisation du système de peuplement, illustrée par l'évolution de la distribution rang-taille des agrégats de foyers paysans au cours du temps de simulation (Figure 39). Les agrégats ont des tailles (en termes de nombre de foyers paysans qu'ils contiennent) très diversifiées, les plus gros agrégats étant moins nombreux que les plus petits. Si une distribution rang-taille a la forme d'une droite, ceci signifie que la taille relative des agrégats est invariante d'échelles (cf. chapitre 3, section 1.1 de ce mémoire) mais on remarque qu'aucune des quatre distributions représentées sur la Figure 39 n'a cette forme, la courbe en 920 étant celle qui s'en rapproche le plus. En 800, la fin de la forme de la distribution est concave ce qui montre que la différence de taille entre les gros agrégats et les plus petits est relativement peu importante. Inversement, à partir de 1020, la distribution est convexe car la taille des plus gros agrégats a augmenté davantage, en proportion, que celle des petits agrégats.

4.4 Synthèse des analyses

Les résultats de simulation montrent que la concentration, respectivement dispersion, des foyers paysans, des ménages ou des bâtiments change (plus ou moins selon les cas) au cours du temps. Pour MobiSim-DR, les changements résultent de règles de création de logements et de bâtiments relevant de trois niveaux d'organisation (macro-, méso- et micro-géographiques). Pour SimFeodal et MobiSim-MR, ils résultent de la superposition et de l'imbrication de multiples voisinages plus ou moins étendus, dont chacun définit l'enveloppe d'une catégorie d'interactions potentielles. Ainsi, dans le scénario simulé avec SimFeodal, les déplacements des agents évoluent en cours de simulation : peu nombreux au début, ils sont nombreux et surtout locaux en milieu de simulation, puis diminuent en nombre et deviennent plus souvent lointains. Dans MobiSim-MR, les agents se déplacent plus ou moins selon les scénarios. Toutefois, moins de déplacements n'implique pas forcément moins de changements en termes de concentration des agents. En effet, pour la commune de Besançon, la réduction des flux migratoires, qui se produit avec les scénarios DOCS et INDI, permet aux dynamiques démographiques internes de jouer davantage, et de celles-ci découlent une augmentation du nombre de ménages et d'habitants.

Le nombre d'unités de peuplement ne varie pas dans le cas de MobiSim-MR (142 communes) ; il varie un peu dans le cas de MobiSim-DR (954 agrégats bâtis en 2010 et entre 913 et 974 agrégats en 2030) ; il varie beaucoup dans le cas de SimFeodal (d'une quinzaine d'agrégats de foyers paysans en 800 à une centaine en 1140). Concomitamment, on observe une forte hiérarchisation de la taille des unités de peuplement dans le cas de SimFeodal. Dans le cas de MobiSim-DR et MobiSim-MR, la hiérarchie de taille des unités de peuplement, qui existe dès le départ de la simulation, est peu (voire pas) modifiée.

Les différents scénarios thématiques simulés avec MobiSim-DR et MobiSim-MR ont consisté en la modification de la situation initiale (par exemple, la création d'une nouvelle ligne de transport en commun dans MobiSim-MR) et des éléments de contexte (par exemple, la fréquence de chaque catégorie de logements à créer dans chaque agrégat bâti dans MobiSim-DR), tandis que les règles de comportement des agents, elles, n'ont pas été modifiées. Pour chaque scénario, les modifications d'inputs et de variables de contexte ne sont pas énormes et la zone d'étude est soumise à d'assez faibles dynamiques démographiques et de construction de logements. Ceci explique que les différences de résultats de simulation soient relativement peu importantes d'un scénario à un autre. D'un point de vue méthodologique, l'intérêt de leur comparaison est de montrer que les scénarios se différencient ou pas les uns des autres selon les niveaux d'analyse et les indicateurs considérés. De forts impacts au niveau micro-géographique n'impliquent pas forcément de forts impacts au niveau méso- ou macro-géographique. Inversement, une forte différence entre deux scénarios au niveau méso- ou macro-géographique n'implique pas forcément une forte différence au niveau micro- (respectivement méso-) géographique. Dans le cas de MobiSim-DR, les différences entre scénarios sont surtout visibles aux niveaux méso- et micro-géographiques. Dans le cas de MobiSim-MR, les différences entre les scénarios sont les plus nettes quand on désagrège l'analyse pour une variable sociale (*i.e.* on considère uniquement les ménages de moins de 45 ans avec enfants) et non spatiale.

5. Rôle et objectif de la simulation pour chacun des modèles

« Même si les sciences sociales ont développé une assez grande variété de pratiques de modélisation, les plus répandues au XXe siècle sont principalement de trois types.

1- Ce sont, d'abord, les modèles pour l'analyse de données. Ils appartiennent à la première grande catégorie, celle des modèles qui visent à faciliter une expérience ou la présentation de données de l'expérience. Au moyen de techniques comme la réduction de variance, ce type de modèle vise à repérer les corrélations, à résumer et à cribler l'information empirique. Il sert aussi à suggérer inductivement des liens causaux entre divers facteurs. Dès ses débuts, l'informatique a joué un rôle majeur dans le traitement numérique massif de données qu'impliquait ce type de modèle : mais précisément, cela n'engageait pas encore un usage computationnel de l'ordinateur.

2- Ce sont, ensuite, les modèles purement phénoménologiques et prédictifs, modèles souvent prônés par les économistes tenants d'un instrumentalisme positiviste à la Friedman (1953). Pour cette conception de la modélisation mathématique, un modèle sert à organiser de manière pratique et économe (selon le principe du rasoir d'Occam) le matériau empirique tout en permettant de faire des prédictions utiles.

3- Ce sont, enfin, les modèles explicatifs (ou modèles de mécanisme) qui se fondent sur des hypothèses théoriques, à validité plus ou moins locale, mais qui se veulent explicatives : grammaires génératives, modèles de l'acteur rationnel, modèles de préférences pour expliquer les phénomènes de ségrégation, structures d'interaction expliquant les stratégies scolaires... Ce genre de modèle permet de tester des hypothèses de mécanismes opérant au niveau de l'individu » (Varenne 2010).

Au regard de cette classification des modèles, MobiSim-MR et SimFeodal relèvent clairement de la troisième catégorie. En revanche, MobiSim-DR peut être classé dans la deuxième ou dans la troisième catégorie²⁸.

F. Varenne distingue aussi, à la suite de R. Boudon (1967), les "modèles de simulation" des "simulations de modèle".

« Si l'opération cognitive fait porter l'emphase sur le modèle, la simulation reste un simple instrument de traitement, c'est-à-dire de calcul, au service d'un modèle. Le rôle de la simulation reste ancillaire par rapport au modèle. On a alors affaire à une "simulation de modèle". Mais si l'on fait porter l'emphase sur la simulation directe du phénomène cible, c'est le modèle qui joue ce rôle ancillaire pour la simulation : les rôles sont inversés. On produit alors un "modèle de simulation" qui sera déterminé à suivre les contraintes prioritaires de ce que l'on souhaite obtenir : la simulation du système cible » (Varenne 2010).

Dans (Varenne 2017), les "modèles de simulation" sont dénommés "modèles de simulation de système" (ou "modèles de simulation-1") tandis que les "simulations de modèle" sont dénommées "modèles de simulation de modèle" (ou "modèles de simulation-2"). Dans un modèle de simulation de modèle, la simulation sert au traitement numérique d'un système d'équations mathématiques, possiblement complexe mais uniforme d'un point de vue formel. Inversement, un modèle de simulation de système intègre un ensemble de processus (mécanismes) hétérogènes nécessitant la synthèse de données elles aussi hétérogènes. Un tel modèle est souvent qualifié de

²⁸ F. Varenne (2010) fait remarquer que les modèles de ces deux catégories facilitent la formulation intelligible d'un phénomène, tantôt pour la prédiction, tantôt pour l'explication.

"computationnel" car ne possédant pas (à première vue) d'équivalent mathématique immédiat, bien qu'en principe il soit toujours équivalent à une approche formelle déductive (Epstein (2006) cité dans (Varenne 2010))²⁹. Selon ces définitions, les modèles Mobisim-MR et SimFeodal sont deux modèles de simulation de système. MobiSim-DR, lui, est un modèle de simulation de modèle car il ne comporte qu'un seul mécanisme et pourrait assez facilement (en tous cas beaucoup plus facilement que MobiSim-MR et MobiSim-DR) être formulé au moyen d'un système d'équations mathématiques.

5.1 Fonctions épistémiques de chaque modèle

Parmi les 21 fonctions épistémiques possibles des modèles identifiées par F. Varenne (2017), nous allons tenter d'identifier celles qui concernent l'un ou l'autre des modèles MobiSim-DR, MobiSim-MR et SimFeodal. Pour commencer, comme les trois modèles sont des modèles descriptifs qui visent à reproduire des faits stylisés, ils assurent la fonction épistémique n°7 (*Faciliter la reproduction ou production de structures de données par des moyens intelligibles déductifs ou de calcul*).

Dans MobiSim-DR, le processus de développement résidentiel modélisé diffère largement de celui observé dans la réalité empirique. De fait, l'objectif de MobiSim-DR n'est pas d'explorer les résultats (potentiellement inattendus) de mécanismes réalistes simulés, mais d'obtenir des configurations spatiales réalistes qui répondent à un certain nombre d'objectifs réalistes en matière d'aménagement urbain, à différents niveaux géographiques. Par conséquent, MobiSim-DR est un modèle purement phénoménologique, permettant uniquement de produire, avec des moyens économes, une série de configurations spatiales attendues³⁰.

Les modèles de simulation de système possèdent plusieurs fonctions épistémiques simultanément. Tel n'est pas le cas de MobiSim-DR, qui répond uniquement à la fonction épistémique n°7. Par contre, MobiSim-MR et SimFeodal assurent, eux, d'autres fonctions épistémiques, dont notamment la fonction n°8 (*Faciliter une explication*). Différentes définitions au terme "explication" peuvent être trouvées dans la littérature. Ici, nous retenons celle-ci : « (...) *par explication, on entend la description de processus d'interactions et de mécanismes censés être majoritairement à l'origine du changement d'état du système cible dans des conditions données* » (Varenne 2017). Selon cette définition, pour qu'un modèle soit explicatif, il faut que l'ontologie du domaine du modèle soit explicitement reliée à l'ontologie du domaine empirique, c'est-à-dire que les variables, paramètres et formalismes mathématiques utilisés soient interprétés en termes de géographie, ce qui est le cas pour MobiSim-MR et SimFeodal. D. Pumain (2012) insiste aussi sur le fait qu'une explication utile pour une construction théorique en géographie doit relier un fait stylisé à des processus (mécanismes génératifs) qui font sens à toutes les échelles³¹. « *Pour produire une bonne explication il ne suffit pas d'imaginer un processus qui ne reproduise que le résultat final de la forme de la distribution au niveau macro-géographique, encore faut-il que les modalités de cette morphogenèse aient aussi été testées et validées à d'autres niveaux, empiriquement et théoriquement. En*

29 « (...) *les recours à la programmation informatique qui, grâce à la souplesse et à l'expressivité croissantes des langages de programmation, autorisent directement à modéliser des idées plutôt qu'à analyser des nombres. En ce sens, la modélisation formelle orientée vers la simulation directe de système cible se fonde sur la prise de conscience progressive qu'il n'est pas nécessaire de passer par une représentation mathématique préalable traditionnelle (fonctionnelle et, en particulier, analytique)* » (Varenne 2017).

30 « (...) *un tel modèle de données prend l'aspect de ce que nous avons appelé un modèle de probabilité et non celui d'un modèle probabiliste ou stochastique. Cela signifie qu'un tel modèle a pour fonction prioritaire de dénoter directement des probabilités - une distribution - et non des mécanismes supposés par ailleurs être probabilistes* » (Varenne 2017).

géographie, l'explication sera donc à rechercher parmi des processus qui engendrent, à micro ou méso échelle, de fortes inégalités territoriales ou spatiales, en termes de dimension (superficie des îles), de valeurs de concentration, d'accumulation de population ou de richesse (cas des villes), ou d'autres » (Pumain 2012). Ce faisant, « l'explication est une affaire d'interactions élémentaires puis de changement de niveau d'appréhension, pas une affaire de déduction, contrairement à ce que le modèle général de Hempel³² impose pour toute explication. L'explication ne relève pas d'un mécanisme qui ferait effet à l'intérieur d'un seul et unique niveau de réalités ou de symboles » (Varenne 2017). De fait, les modèles MobiSim-MR et SimFeodal sont constitués de mécanismes de niveau micro- ou méso-géographique supposés avoir, individuellement et de manière combinée, un impact sur les différenciations spatiales observées aux niveaux méso- ou macro-géographiques. Ainsi, dans les deux modèles, les formalisations mathématiques logico-déductives sont partiellement remplacées par des interactions intra-échelles et inter-échelles. Les deux modèles intègrent aussi des données relevant de différents niveaux thématiques et/ou méthodologiques. D'après F. Varenne (2017), ces deux caractéristiques sont partagées par tous les modèles de simulation de système et sur elles repose le pouvoir explicatif de tels modèles.

Concomitamment à la fonction épistémique n°8 (Faciliter une explication), les modèles MobiSim-MR et SimFeodal assurent aussi la fonction épistémique n°9 (Faciliter une compréhension). En effet, les deux modèles correspondent au cas où « la fonction n°8 implique que la fonction n°9 (compréhension) soit d'abord assurée. Le modèle doit dans ces conditions se concentrer sur la formalisation des décisions individuelles en tant qu'elles déterminent des processus et pas seulement des successions. Un processus, dans ce contexte qui n'est pas de pure mathématique, n'est pas seulement un enchaînement de faits. C'est un enchaînement de faits qui donne en même temps à voir, à concevoir et - en l'occurrence - à faire comprendre les mécanismes par lesquels l'état suivant procède de l'état précédent. Ces mécanismes sont compréhensibles car ils sont appréhendés prioritairement en termes de logique (compréhension interprétative) plutôt que de causalité (...) » (Varenne 2017).

D'autre part, MobiSim-MR et SimFeodal assurent également la fonction épistémique n°16 (Faciliter l'hybridation et la co-calculabilité de plusieurs théories).

Si un modèle « (...) est composé d'éléments de théories, qui plus est, portant sur des domaines formels d'objets hétérogènes et non co-conceptualisables dans un même et unique cadre formel et axiomatique, alors il ne s'agit pas d'un véritable modèle théorique au sens de la fonction n°10. Il s'agit avant tout d'un modèle d'explication (fonction n°8) se trouvant assurer également non pas la fonction n°10 mais très exactement la fonction n°16, à savoir l'hybridation et la co-calculabilité de plusieurs théories ou ébauches de théories (modèles théoriques) indépendantes. (...) C'est d'ailleurs bien cette co-calculabilité finalement que les auteurs dénotent lorsqu'ils parlent "d'expérimenter" des éléments de théorie au moyen de la computation du modèle. (...) Remarquons que ce sont précisément ces "éléments de théorie" qui, dans les années 2010, tendent à être remplacés par le terme "ontologies" opportunément venu de l'informatique : avec l'expression "éléments de théorie", on était encore trop vague sans doute » (Varenne 2017).

Enfin, MobiSim-MR assure la fonction épistémique n°18 (Faciliter la délibération et la concertation entre parties prenantes d'un même problème scientifique ou scientifico-technique)

31 Dans la perspective de l'individualisme méthodologique, souvent adoptée en économie (entre autres disciplines), on espère expliquer un phénomène social en le rapportant aux comportements des acteurs individuels.

32 Cf. C. G. Hempel (1965). Aspects of scientific explanation, in C. G. Hempel, *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*, New York, The Free Press, pp. 336-337. Cité dans (Varenne 2017).

quand il est utilisé pour l'aide à la décision en matière d'aménagement urbain³³. Comme il s'agit d'un modèle descriptif dont les règles sont explicites d'un point de vue thématique, les chercheurs (concepteurs ou utilisateurs du modèle) et les personnes en charge de l'aménagement urbain (praticiens et élus locaux) peuvent dialoguer tant sur les résultats du modèle que sur le modèle lui-même avec. Dans ce cadre, la simulation de scénarios prospectifs avec Mobisim-MR consiste en une "extrapolation à partir d'un modèle descriptif" (Varenne 2010) et le modèle peut être qualifié de "projectif", c'est-à-dire permettant l'exploration de scénarios alternatifs pour un futur proche (Varenne 2017).

« The model is descriptive and exploratory, but not predictive because of the complexity of the phenomena involved. It is also not prescriptive: its aim is to explore and not to provide solutions or to identify the best solution among a small set of options. It is a structured examination of the complex dynamics at work in a city with a view to offering computerized assistance for human reasoning » (Tannier, Hirtzel et al. 2016).

5.2 Apport spécifique de la simulation multi-agents

« La modélisation à base d'agents permet de formaliser des hypothèses sur les interactions entre les entités auxquelles s'intéresse le chercheur et d'explorer, par simulation avec un SMA, les résultats de ces interactions à d'autres échelles d'observation » (Livet, Phan, Sanders 2014). Si les entités élémentaires d'un modèle multi-agents correspondent à des entités du monde réel, si les règles d'action des agents sont choisies pour être réalistes bien que fortement simplifiées et si, de plus, l'allure du résultat de simulation est elle-même réaliste, il semble que l'on puisse en conclure que la computation a effectivement testé un mécanisme social, sachant que le modèle ne prouve pas directement une hypothèse mécaniste mais montre seulement sa plausibilité de principe (Varenne 2010)³⁴. Si, en revanche, les résultats de simulation ne représentent pas (ou incorrectement) le fait stylisé attendu, ceci conduit à concevoir d'autres mécanismes supposés expliquer le fait stylisé. Les mécanismes génératifs d'un fait stylisé sont déterminés au moyen d'un raisonnement abductif : *« il ne s'agit pas de généraliser à partir des observations, mais de former des conjectures pertinentes à partir de ces observations (comme le fait le médecin avec les symptômes), puis de soumettre cette conjecture à l'épreuve des faits » (Livet et al. 2014).* Plusieurs auteurs ont mis en avant le fait que la capacité d'un modèle à reproduire des faits observés ne permet pas de le valider (voir à ce sujet (Amblard et al. 2006 et 2007)). En effet, il est possible de simuler une même configuration socio-spatiale à un niveau macro-géographique à partir de différents ensembles de mécanismes permettant. *« Prédire n'est pas expliquer » (Thom 1993), a fortiori dans le cas des systèmes complexes (Livet et al. 2014).* D'autres auteurs expriment ceci à travers de l'idée de sous-détermination entre processus et lois morphologiques (Varenne 2016).

« La science progresse par des allers-retours entre les deux approches : la multiplication et comparaison des observations empiriques permettent de construire un fait stylisé (...), dont on vérifie ensuite la validité à partir d'autres cas empiriques, et dont on recherche la logique de production en identifiant les "mécanismes génératifs" » (Banos & Sanders 2013).

33 Pour une discussion détaillée du rôle et de l'utilité de MobiSim-MR pour l'aide à la décision en matière d'aménagement urbain, voir (Tannier, Hirtzel et al. 2016).

34 *« (...) ce type de modèle permet d'identifier un candidat explicatif pour ce phénomène, sans que ce soit nécessairement la seule explication possible, ni même forcément l'explication pertinente dans tous les cas de figure » (Livet et al. 2014).*

Dans le cas des modèles MobiSim-MR et SimFeodal, il s'agit de saisir une dynamique en cours. Cette dynamique est formalisée sur la base d'hypothèses sur les entités et leurs interactions à l'origine des différenciations spatiales observées ; chaque modèle sert à explorer les configurations spatiales émergentes (faits stylisés), dans le but de revenir ensuite sur les hypothèses des modèles pour les infirmer ou les confirmer (Mathian & Tannier 2015). Toutefois, on ne dispose pas de faits stylisés observés qui puissent être directement comparés aux configurations simulées. D'une part, MobiSim-MR simule des configurations futures (donc inconnues par définition), à l'horizon 2030. D'autre part, pour la période 800-1100 (SimFeodal), il n'existe pas de données empiriques sur le nombre et la localisation de chaque agrégat de foyers paysans, ni sur le nombre d'habitants (ou d'attracteurs) dans chaque agrégat. Pour les deux modèles cependant, les données empiriques permettent de définir des mécanismes génératifs, de façon assez précise dans le cas de MobiSim-MR car il existe énormément d'études et d'enquêtes sur le domaine, et de façon moins précise dans le cas de SimFeodal, à partir d'analyses de sources écrites et de résultats de fouilles archéologiques. Sur cette base, la simulation vise, pour SimFeodal, à explorer à quel point la modification des inputs et des mécanismes génératifs (test de différentes valeurs de paramètre) a un effet sur les faits stylisés simulés. Pour MobiSim-MR, comme les mécanismes génératifs sont supposés être "vrais" (ou en tous cas bien connus), la simulation sert essentiellement à explorer l'effet de modifications des variables de contexte sur les configurations méso-géographiques et macro-géographiques simulées. Dans les deux cas, on compare des résultats de simulation entre eux et non à des faits stylisés observés. L'étude des différences et des points communs entre les résultats de simulation permet de mieux comprendre le fonctionnement du système modélisé. MobiSim-MR et SimFeodal servent donc à expérimenter *in silico*. A termes, la multiplication de telles expérimentations devrait faciliter la formalisation et la quantification des cinq lois générales énoncées dans le chapitre 1 de ce mémoire, pour différents cas (différents contextes, différentes entités thématiques) de concentration et dispersion des implantations humaines.

6. Conclusion du chapitre 2

Un premier élément de conclusion est que les modèles présentés dans ce chapitre respectent les principes énoncés par A. Banos (2013) pour de "bonnes pratiques" en modélisation.

- *Principe 1. Modéliser c'est apprendre*
- *Principe 2. Le modélisateur n'est pas omni-compétent*
- *Principe 3. Les modèles de simulation doivent s'enraciner dans les données*
- *Principe 4. Le comportement de chaque modèle doit être connu de manière précise*
- *Principe 5. Le modélisateur doit cesser de proposer des solutions uniques et optimales à des problèmes complexes*
- *Principe 6. Le modélisateur n'est pas le « gardien de la vérité prouvée », ses modèles doivent être accessibles dans leur intégralité afin d'être reproduits³⁵.*

Un des apports essentiels des modèles multi-agents est que leur mode de présentation les rend plus immédiatement intelligibles et signifiants pour les praticiens des sciences sociales, (Epstein 2006) cité dans (Varenne 2010). P. Livet, J.-P. Müller, D. Phan et L. Sanders (2010) précisent à ce sujet que : « *The success of this methodological framework is due to its flexibility and its capacity to represent social phenomena by means of intuitive and iconic objects and relations, where differential equation and classical microsimulation rather fail* » (Livet et al. 2010). « *Les phénomènes, objets et relations que nous percevons dans le monde peuvent être "pensés" en termes de modèles à base d'agents, et cette capacité de re-conception a contribué à leur succès en sciences sociales* » (Livet, Phan, Sanders 2014). Les trois modèles multi-agents, MobiSim-DR, MobiSim-MR et SimFeodal, décrits dans ce deuxième chapitre du mémoire illustrent bien ceci. L'iconicité des entités modélisées est évident, par exemple au niveau élémentaire : bâtiments et logements pour le premier ; logements et ménages pour le second ; églises paroissiales, châteaux, seigneurs et foyers paysans pour le troisième.

Un autre intérêt des systèmes multi-agents est qu'ils permettent la simulation de données, dans le sens où « (...) *les "traces" d'exécution d'une simulation par SMA peuvent (...) être considérées comme des "données" produites in silico et analysées à ce titre avec les méthodes en usage dans le domaine empirique, de la même manière que les relevés d'observations effectués sur des phénomènes empiriques* » (Livet, Phan, Sanders 2014). Ainsi pour les modèles MobiSim-MR et SimFeodal, outre l'analyse des résultats finaux de simulation, nous avons pu analyser les résultats de simulation relatifs à différents mécanismes génératifs considérés individuellement, par exemple la satisfaction résidentielle des ménages ou les types de déplacements des foyers paysans. Nous avons aussi montré que les résultats obtenus lors du paramétrage des modèles, y compris les résultats des analyses de sensibilité, apportent autant de connaissances sur les systèmes modélisés que les résultats finaux de simulation.

35 On pourrait ajouter « *et contredits* ».

Z. Sun, I. Lorscheid *et al.* (2016) insistent sur le fait que : « (...) *if complicated models stay purely site-specific and data-driven, the scientific contribution of such models will be limited. Modellers should aim to ground their models on solid theories and, more importantly, endeavour to generalize new theories from complicated simulation models* ». De fait, les trois modèles MobiSim-DR, MobiSim-MR et SimFeodal ont des fondements théoriques clairs et explicites auxquels les résultats de simulation peuvent être confrontés. L'existence de ces fondements rend possible l'interprétation thématique des résultats de simulation et garantit la valeur de leur contribution au domaine empirique. Additionnellement, ceci montre que le dialogue entre théorie, modèle et données, bien connu dans les sciences expérimentales, existe aussi en sciences sociales, cf. (Tannier, Franc, Ouriachi, Zadora-Rio *sous presse*).

En 2007, L. Sanders a écrit :

« L'étude de la plupart des phénomènes géographiques implique un questionnement sur les échelles associées. Cependant, si la conscience de la dimension multi-scalaire est prégnante dans l'interprétation, il est rare qu'elle soit explicitement intégrée dans les modèles. Les méthodes statistiques sont sans doute plus avancées dans cette voie que les modèles dynamiques (Courgeau, 2004 ; Mathian et al., 2001). L'idéal, c'est-à-dire être capable de formaliser l'articulation entre plusieurs niveaux géographiques en intégrant les boucles de rétroaction dans les deux sens, est trop complexe étant donné le stade actuel des connaissances. La complexité de ces interactions entre niveaux est en effet telle, qu'il est difficile de les "styliser" ».

Les modèles et résultats de simulation présentés dans ce deuxième chapitre du mémoire montrent que la recherche a avancé depuis 2007 car les modèles MobiSim-MR et SimFeodal intègrent différents niveaux géographiques en interaction les uns avec les autres. Ces interactions entre niveaux résultent de l'existence d'interactions entre les agents et leur environnement à la fois proche et lointain. Sur cette base, les résultats de simulation ont été analysés en considérant différents niveaux d'agrégation thématiques et méthodologiques, ce qui a permis de mieux les comprendre et les interpréter.

Chapitre 3

Variation de la concentration et de la dispersion des implantations humaines à travers les échelles : modèles mono- et multi-fractals

Les implantations humaines présentent des degrés de concentration variables dans l'espace et le temps : à l'échelle locale, centre-villes ou centres villageois, quartiers péri-centraux, extensions périphériques (zones d'activités, lotissements) ; à l'échelle d'une aire urbaine, agglomérations monocentriques ou polycentriques, compactes ou étalées ; à l'échelle régionale, systèmes de peuplement plus ou moins diffus et plus ou moins hiérarchisés. Pour mesurer et caractériser ces concentrations, on peut mobiliser des modèles multi-échelles et/ou trans-échelles qui permettent de déterminer en quoi et comment la concentration des implantations humaines varie d'un niveau d'analyse à un autre et d'identifier d'éventuelles invariances d'échelles, dont le degré de généralité peut varier dans l'espace et dans le temps. L'objectif de ce troisième chapitre du mémoire est de décrire et de différencier les modèles basés sur une hypothèse d'invariance d'échelles et ceux basés sur une hypothèse d'auto-similarité (modèles fractals), ainsi qu'à discuter de leurs apports respectifs tant pour l'analyse des états de concentration ou de dispersion que pour la simulation de processus de concentration et de dispersion.

1. De l'observation d'invariances d'échelles aux méthodes d'analyse fractale

« Il se produit parfois des variations systématiques du rapport entre la taille d'un élément et celle d'autres éléments ou de l'ensemble du système, telles que ces quantités n'évoluent plus dans un simple rapport de proportionnalité, mais selon des lois de puissance. Présentons ces modèles connus sous l'appellation de "scaling laws" ou lois d'invariance d'échelle, qui décrivent la forme que prend la relation statistique entre deux variables mesurées sur des objets à des échelles différentes (West, 1988) » (Pumain 2007).

« (...) power laws are the hallmark of scale invariance and are the quantitative counterpart of fractal descriptive tools » (Dubrulle, Graner, Sornette 1997).

1.1 Invariance d'échelles, lois de puissance et auto-similarité : quelques définitions

Invariance d'échelles

En géographie, comme en physique, en biologie, en économie ou dans d'autres sciences, on observe des cas où une certaine quantité ou caractéristique (taille, revenus, nombre d'éléments) diminue (ou

augmente) en fonction d'une mesure (longueur, rang, intensité...) de façon non proportionnelle. Par exemple, la relation entre la taille des villes et leur nombre n'est pas proportionnelle : dans une région donnée du globe, il y a très peu de villes de grande taille comparé au nombre de villes de taille moyenne et encore davantage, au nombre de villes de petite taille ou de villages. Les distributions statistiques montrant de telles relations non proportionnelles sont dites leptokurtiques (*i. e.* distributions à queue lourde ou *heavy-tail*, qui incluent les distributions à queue longue). La forme de ces distributions est une hyperbole très étirée en abscisse (longue queue provenant du fait que le nombre d'observations pour les petites valeurs de la variable analysée est souvent élevé) et en ordonnée (le phénomène symétrique de la longue queue est un pic initial important provenant du fait que la variable atteint des valeurs très grandes pour un très petit nombre d'observations). La moyenne arithmétique résume très mal de telles distributions, d'où une plaisanterie couramment citée en économie : « *If Bill Gates walks into a bar, on average, everybody in the bar is a millionaire* ».

Certaines de ces distributions à queue lourde varient régulièrement : quand on change l'unité de mesure des échantillons de la distribution, la forme de la distribution n'est pas modifiée non plus que les propriétés qui en découlent. Dans ce cas, la distribution a la propriété d'invariance d'échelles par changement d'unités³⁶ (*i. e.* par translation) (Dubrulle, Graner, Sornette 1997). Celle-ci implique nécessairement une loi de puissance, autrement intitulée loi d'échelles, qui est une relation mathématique de la forme :

$$y = k x^\alpha \quad (1)$$

Où, k est une constante de proportionnalité et α est l'exposant scalant. Par définition, on a :

$$\alpha = dy / dx \quad (2)$$

Une loi de puissance peut être exprimée sous forme linéaire via le passage en coordonnées double logarithmiques :

$$\log(y) = \alpha \log(x) + \log(k) \quad (3)$$

Dans le cas d'une distribution linéaire, l'inégalité entre deux valeurs d'une variable correspond, en ordre de grandeur, à la différence des deux valeurs. Avec une loi de puissance, l'ordre de grandeur de l'inégalité entre deux valeurs d'une variable correspond au rapport entre ces deux valeurs.

« (...) l'ampleur des inégalités entre des objets dépend de la loi de croissance qu'on leur suppose : si elle est additive, on mesure une différence, si elle est multiplicative, on calcule un rapport. (...) Quelle qu'en soit la mesure, toutes les méthodes qui permettent de comparer les poids [des] villes s'appuient sur un modèle de référence qui n'attribue pas la même valeur aux différences mais aux rapports entre ces quantités. Bien que la différence de population soit la même, on considère qu'il y a plus d'inégalité de taille entre une ville de 10 000 et une ville de 20 000 habitants qu'entre une ville de 100 000 et une ville de 110 000 habitants. (...) on admet qu'une ville passant de 10 000 à 20 000 habitants au cours d'une période donnée accomplit la même performance qu'une ville qui passe de 100 000 à 200 000 habitants au cours de la même période » (Pumain 2007).

³⁶ Il existe d'autres cas d'invariance d'échelles indépendants de l'unité de mesure, quand les grandeurs considérées sont sans dimension (Dubrulle, Graner, Sornette 1997).

Une distribution de Pareto³⁷ est une loi de puissance particulière, pour laquelle la probabilité $P[X \geq x]$ qu'une variable aléatoire X ait une valeur supérieure à x est :

$$P[X \geq x] = (x_{min} / x)^a \quad \text{avec } x_{min} > 0, a > 0 \text{ et } x \geq x_{min} \quad (4)$$

x_{min} représente la valeur minimum de la variable x . Le paramètre a de la distribution de Pareto est égal à $\alpha-1$, α étant l'exposant scalant de la loi de puissance correspondante³⁸.

La propriété d'invariance d'échelles peut concerner non seulement des distributions statistiques, mais aussi des distributions de probabilités, des fonctions mathématiques ou même des systèmes physiques. Ainsi, la physique macroscopique au 19e siècle était invariante d'échelles. Ses lois s'appliquaient aux corps célestes comme aux corps à l'échelle humaine ; l'existence des atomes était reconnue mais les lois physiques n'étaient pas définies pour cette échelle. Au 20e siècle, la physique n'est plus invariante d'échelles car il n'existe pas de théorie cohérente unifiant la relativité générale et la physique quantique.

En géographie, les lois d'échelles identifiées sont plus spécifiques que générales bien qu'une ambition universaliste anime certains groupes de chercheurs (Bettencourt, Lobo, Helbing, Kühnert, West 2007 ; Batty 2013 ; Bettencourt 2013).

Au niveau des systèmes de villes, les exposants scalants des distributions rang-taille varient notablement (Bretagnolle, Pumain, Vacchiani-Marcuzzo 2007 ; Cura, Cottineau, Swerts, Ignazzi, Bretagnolle, Vacchiani-Marcuzzo, Pumain *in press*). La loi rang-taille des villes est donc loin d'être universelle (Alperovich 1984 ; Benguigui & Blumenfeld-Lieberthal 2006, 2011).

*« We consider Zipf's and Gibrat's models as benchmarks for comparing urban systems rather than "laws" that would act as principles or constraints on societal processes. Indeed, we are not looking for a "universal" model, unlike some articles from "hard science" (e.g., Corominas-Murtra and Solé 2010). We think that models of urban hierarchy and growth, because of their generality, may well reflect general underlying processes in urban dynamics which are grounded in large numbers of longstanding spatial interactions, obeying geographical constraints which were rather analogous in different economic, cultural, and political systems (Zipf 1941; Pumain 2006; Favaro and Pumain 2011; Hernando et al. 2015). But their application to empirical urban systems also reveal deviations from the general models, some of which can be meaningfully related to the demographical and political evolution of the countries under investigation (Moriconi-Ebrard 1993) » (Cura, Cottineau et al. *in press*).*

Les variations des exposants scalants des distributions rang-taille des villes font l'objet d'après discussions relatives tant aux méthodes utilisées pour estimer les exposants scalants (Soo 2005 ; Gabaix & Ibragimov 2011), au choix des entités spatiales pertinentes (Guérin-Pace 1995 ; Rozenfeld, Rybski, Gabaix, Makse 2011 ; Arcaute, Hatna, Ferguson, Youn, Johansson, Batty 2015 ; Reggiani & Nijkamp 2015 ; Cottineau, Hatna, Arcaute, Batty 2017) qu'aux facteurs explicatifs de leurs points communs et de leurs différences (Gan, Li, Song 2006 ; Eeckhout 2009 ; Pumain, Paulus, Vacchiani-Marcuzzo, Lobo 2006 ; Favaro & Pumain 2011 ; Pumain 2012). De fait, déterminer si un système présente ou non un comportement parétien implique une certaine subjectivité relative aux choix méthodologiques effectués pour ajuster la distribution empirique à

37 Distribution de Pareto de type I, sachant qu'il en existe d'autres types.

38 <http://www.labs.hp.com/research/idl/papers/ranking/ranking.html> - Consulté le 2 septembre 2017. Voir aussi : <https://stats.stackexchange.com/questions/91670/connection-between-power-law-and-zipfs-law>

une distribution de Pareto. Un critère souvent admis pour qu'une distribution puisse être qualifiée de parétienne est que le nombre d'ordres de magnitude de la quantité mesurée soit au moins égal à trois (par exemple, des villes comprenant entre 1 000 et 1 000 000 habitants) (Baveye & Boast 1998).

Au niveau intra-urbain, certains auteurs ont montré, à partir de données réelles et de simulations, que le nombre d'agréats bâtis de chaque taille est inversement proportionnel à celle-ci (White & Engelen 1993 ; White, Luo, Hatna 2001), ce que contredit, au moins partiellement, d'autres résultats de recherche (Benguigui, Blumenfeld-Lieberthal, Czamanski 2006 ; Tannier, Thomas, Vuidel, Frankhauser 2011 ; Tannier & Thomas 2013). Pour 300 agglomérations urbaines européennes, R. Lemoy et G. Caruso (2017) ont montré que le gradient décroissant d'occupation du sol et de densité de population du centre vers la périphérie des villes est le même quelle que soit la population de la ville considérée quand la distance au centre est normalisée par rapport à la population de la plus grande ville. Ils confirment ainsi l'intuition de S. Nordbeck (1971) selon laquelle la forme des villes est identique quelle que soit leur taille, à un facteur d'homothétie près. D'autres auteurs ont mis en évidence l'existence d'une relation allométrique entre la surface bâtie (emprise spatiale) des villes et leur population : « *Population is, to a good degree of approximation, simply proportional to area* » (Rozenfeld *et al.* 2011). L. M. A. Bettencourt *et al.* (2007) et L. M. A. Bettencourt (2013) ont aussi montré une relation scalante entre la population des villes et certaines de leurs caractéristiques : plus la ville est grande, plus le coût des interactions sociales est proportionnellement élevé (nombre de crimes, volume de trafic, congestion) et plus les richesses et le dynamisme économique est important (revenus des habitants, nombre de brevets déposés, nombre de services financiers). Inversement, la longueur des réseaux routiers *per capita* diminue avec la taille de la ville.

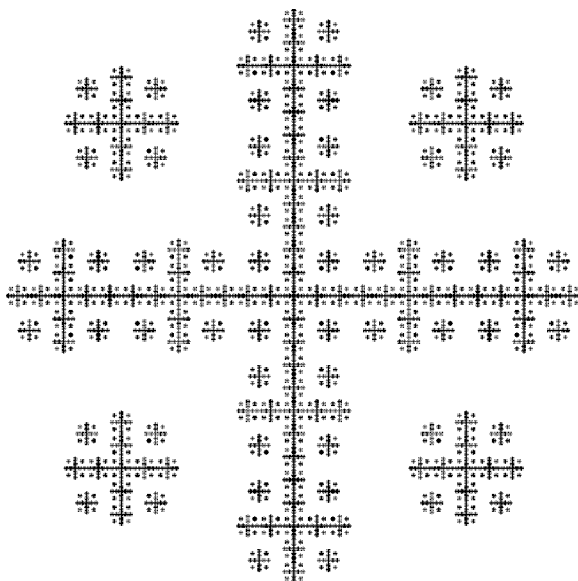
L'ensemble de ces travaux concernant l'identification de lois d'échelles en géographie, ainsi que de nombreux autres travaux non cités ici, suscitent cinq remarques importantes.

- 1) « *Because of the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) and of the heterogeneous morphologies and social landscapes in the cities' internal space, scaling estimations are subject to large variations, distorting many of the conclusions on which generative models are based* » (Cottineau *et al.* 2017).
- 2) « *Scaling relationships, and more generally data analysis, have an important role to play in the rising new science of cities. But (...) it is dangerous to interpret empirical results without any mechanistic insight. Conclusions cannot safely be drawn from data analysis alone* » (Louf & Barthelemy 2014).
- 3) « *(...) la physique ou la biologie admettent qu'on puisse établir des liens forts entre des observations transversales, faites à un moment donné sur un ensemble d'éléments ou des individus de taille différente, et des lois longitudinales relatives au développement, à la croissance, voire à l'évolution, de ces éléments. Il reste à vérifier dans quelle mesure cette hypothèse est valide, jusqu'à quel point les inégalités observées entre les villes à un moment donné (comparaison transversale) sont de même nature que les différents états qu'elles ont traversés au cours leurs trajectoires historiques (observation longitudinale)* » (Pumain 2007)³⁹.

39 D. Pumain (2010b) précise à ce sujet, concernant les systèmes de villes : « *Cette interprétation de lois transversales dans les termes de la trajectoire longitudinale d'une seule ville, suppose que le système de villes soit ergodique. Cette condition n'est pas vérifiée selon une théorie évolutive des villes qui intègre division spatiale du travail et diffusion hiérarchique des innovations* ».

- 4) Une loi de puissance représente une distribution hiérarchique structurelle. Cependant, le fait qu'une distribution soit invariante d'échelles n'implique pas forcément que les processus à l'origine de cette distribution soient dépendants d'échelles. La dépendance d'échelles suppose en effet l'existence d'interactions entre échelles, c'est-à-dire que ce qui se passe à un niveau d'analyse microscopique est influencé par ce qui se passe à un niveau méso- ou macroscopique, et vice versa (cf. chapitre 1, section 4.2 de ce mémoire). Inversement, l'existence d'une dépendance d'échelles n'implique pas forcément que la distribution ordonnée des éléments soit invariante d'échelles.
- 5) Différents modèles (ou lois) de croissance peuvent aboutir à des distributions invariantes d'échelles, les plus connus étant le modèle de croissance proportionnelle de R. Gibrat (1931) (dans un système de ville, chacune des villes voit, au cours du temps, varier sa taille proportionnellement à celle du système, voir (Pumain 2007)), les modèles de croissance allométriques inspirés de d'Arcy Thompson (1917) (certains éléments croissent plus vite que d'autres), et les modèles de croissance fractale (voir (Frankhauser 1990)). Cependant, ces modèles de croissance ne font que produire des distributions invariantes d'échelles et non expliquer les déterminants de leur existence (cf. chapitre 2, section 5.1 de ce mémoire).
- 6) La concentration des implantations humaines en un lieu peut résulter de processus de croissance *in situ* mais aussi de l'afflux de population et/ou d'activités provenant d'autres lieux. Par exemple, le modèle SimFeodal (cf. chapitre 2 de ce mémoire) simule, avec les valeurs de paramètres fixées par défaut, une hiérarchisation des agrégats de foyers paysans en fonction de leur taille qui résulte uniquement des mouvements migratoires des foyers paysans. Inversement, le modèle MobiSim-DR simule une évolution de la concentration de bâtiments résidentiels résultant uniquement de la construction de nouveaux bâtiments. Et le modèle MobiSim-MR simule, lui, une évolution de la concentration de ménages résultant à la fois de leurs mouvements migratoires et de l'augmentation de leur nombre (par création de nouveaux ménages, séparation de ménages existants et arrivée de ménages depuis l'extérieur de la zone d'étude).

Figure 40. Ville fractale théorique strictement auto-similaire. Extrait de (Tannier, Thomas, Vuidel, Frankhauser 2011).



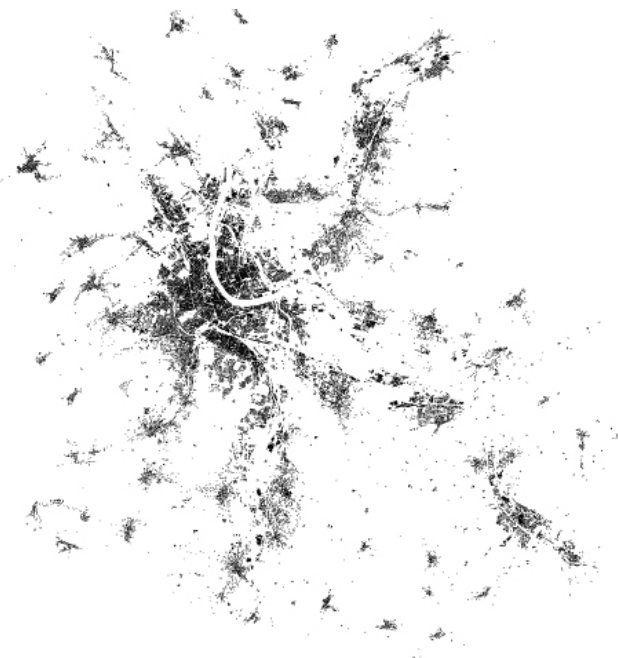
Auto-similarité et fractalité

On distingue trois types d'auto-similarité. L'auto-similarité stricte caractérise un objet dont la forme est exactement la même quelle que soit l'échelle considérée (Figure 40). « *A set is strictly self-similar if it can be expressed as a union of sets, each of which is a reduced copy of (is geometrically similar to) the full set* » (Theiler 1990). Un tel objet est construit au moyen d'une combinaison de réductions (ou d'augmentations), de rotations, de translations et/ou de réflexions appliquées à lui-même.

Figure 41. Ville fractale théorique statistiquement auto-similaire. Le générateur fractal inclut un facteur aléatoire concernant la position des éléments les uns par rapport aux autres. Extrait de (Tannier, Thomas, Vuidel, Frankhauser 2011).



Figure 42. Un tissu urbain bâti : l'agglomération de Bâle en 1957. Source : digitalisation manuelle de cartes topographiques du *Bundesamt für Landestopographie*, 3084 Wabern (Allemagne).



La quasi auto-similarité caractérise des objets construits selon une règle mathématique récursive non aléatoire mais dont les parties qui le composent ont une forme déformée ou dégénérée par rapport à l'ensemble. L'exemple le plus connu d'objet quasiment auto-similaire est l'ensemble de Mandelbrot.

Les objets de la nature ne sont ni strictement, ni quasiment auto-similaires. Ils sont statistiquement auto-similaires quand seules des mesures numériques ou statistiques caractérisant leur forme sont identiques à travers les échelles. Dans ce cas, leur forme est approximativement, mais non exactement, la même à différentes échelles (Figures 41 et 42).

« In a coastline, for instance, there is an irregular nesting of gulfs, bays, harbors, coves, and inlets that are observed over a broad range of spatial scales. (...) A magnified view of one part of the coastline will not precisely reproduce the full picture, but it will have the same qualitative appearance. A coastline displays the kind of fractal behavior that is called statistical self-similarity » (Theiler 1990).

Le caractère statistiquement auto-similaire d'une configuration spatiale implique que la ou les règles de répartition des éléments les uns par rapport aux autres se répètent à peu près à différentes échelles. Ces règles de répartition peuvent être très différentes. Par exemple, celles définissant la construction d'un tapis de Sierpinski (objet fractal strictement auto-similaire) font que les éléments sont connectés les uns avec les autres et forment un unique agrégat à toutes les échelles (Mandelbrot 1982). Inversement, dans une poussière de Fournier (autre objet fractal strictement auto-similaire), les éléments sont séparés les uns des autres par des lacunes de tailles différentes, et le nombre et la taille de celles-ci (et donc la distance qui sépare les agrégats les uns des autres) suivent une loi d'échelles.

Une quatrième propriété, l'auto-affinité, se rapproche de l'auto-similarité mais est plus générale.

« A fractal is self-affine if it can be decomposed into subsets that can be linearly mapped into the full figure. If this linear map involves only rotation, translation, and (isotropic) dilation, then the figure is self-similar. For a self-affine map, the contraction in one direction may differ from the contraction in another direction. The class of self-affine fractals therefore includes the class of self-similar fractals » (Theiler 1990).

A travers ces quelques définitions, on voit que l'auto-similarité (et l'auto-affinité) impliquent la propriété d'invariance d'échelles mais non réciproquement. *« Looking at a self-similar density with different magnifying glass or scale is not the same as changing the units of the measurement »* (A. Wierman, blog *Rigor + Relevance*, 05.12.14⁴⁰).

Sont fractals des objets (ensembles de points au sens mathématique) qui possèdent au moins l'une des caractéristiques suivantes (définition de K. Falconer (1990) citée dans (Baveye & Boast 1998)⁴¹) :

- ils sont exactement, quasiment ou statistiquement autosimilaires ;
- leur forme présentent des détails nombreux à des échelles fines ;
- ils sont trop irréguliers pour être décrits efficacement en termes géométriques traditionnels, tant localement que globalement ;

40 *Scale Invariance, Power Laws, and Regular Variation (Part I)*

<https://rigorandrelevance.wordpress.com/2014/05/12/scale-invariance-power-laws-and-regular-variation-part-i/> - Consulté le 2 septembre 2017.

41 Cette définition est reprise quasiment à l'identique dans Wikipedia (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Fractale> - Consulté le 2 septembre 2017).

- leur dimension de Hausdorff est strictement supérieure à leur dimension topologique (voir section 1.2 de ce chapitre). Par exemple, une ligne a une dimension topologique égale à 1 ; quand elle comporte tellement de digitations et d'indentations qu'elle couvre quasiment une surface, sa dimension de Hausdorff est supérieure à 1 (mais inférieure à 2) ;
- leur principe de construction peut être très simple ; s'il est récursif, les différentes étapes de construction de l'objet fractal sont des préfractales.

On le voit, cette définition est assez vague. Selon l'une ou l'autre acception du terme, un objet fractal peut ne pas être auto-similaire, ni même auto-affine, mais présente forcément une ou plusieurs caractéristiques invariantes d'échelles. En effet, pour K. Falconer (1990) cité dans (Baveye & Boast 1998) : « *My personal feeling is that the definition of a "fractal" should be regarded in the same way as the biologist regards the definition of "life". There is no hard and fast definition, but just a list of properties characteristic of a living thing (...)* ».

Afin de définir plus clairement la fractalité des objets, certains auteurs établissent une distinction entre les fractales dites *probabilistes* et les fractales dites *géométriques* (Baveye & Boast 1998). Les premières sont définies uniquement par le fait qu'une distribution de Pareto représente correctement la distribution empirique étudiée. Selon cette définition, la fractalité est synonyme d'invariance d'échelles. Dans le cas des fractales géométriques, en revanche, l'existence de lois d'échelles entre certaines de leurs caractéristiques est une *conséquence* de leur fractalité et non une condition. Les fractales géométriques sont donc caractérisées par une invariance et une dépendance d'échelles.

Traitant dans ce mémoire de la concentration et de la dispersion des implantations humaines, nous considérons uniquement des fractales géométriques. Celles qui nous intéressent présentent une auto-similarité statistique qui caractérise la forme d'une distribution spatiale (semis de points, distribution spatiale de bâtiments ou de population...). Leur invariance d'échelles résulte d'une relation entre la taille des éléments (par exemple, des agrégats de bâtiments ou d'habitants), leur nombre et la *distance* qui les séparent. Comme les fractales géométriques sont par définition inscrites dans l'espace, leur dimension fractale doit être comprise entre leur dimension topologique et la dimension euclidienne de leur espace support (qui est le plan dans tous les travaux présentés ci-après). Cette condition ne concerne pas les fractales probabilistes, pour lesquelles la valeur de leur exposant scalant n'a, de fait, pas de sens "physique".

1.2 Méthodes d'analyse fractale

L'analyse fractale a été largement utilisée en géographie depuis presque quarante ans. Les travaux pionniers ont mis en avant le fait que les configurations spatiales locales et globales sont liées entre elles et présentent certaines caractéristiques invariantes d'échelles (Goodchild 1980 ; Arlinghaus 1985, 1987 ; Batty & Longley 1986, 1987 ; Goodchild & Mark 1987 ; Frankhauser 1988). Spécifiquement en géographie urbaine, des chercheurs ont exploré l'hypothèse que les processus à l'origine de la croissance urbaine aboutissent à des configurations spatiales fractales (Makse Andrade, Batty, Havlin, Stanley 1998 ; Fotheringham, Batty, Longley 1989 ; Batty & Longley, 1994 ; Frankhauser 1990, 1994 ; Batty & Xie 1996, 1999 ; Benguigui, Czamanski, Marinov, Portugali 2000 ; Shen 2002). Par la suite, un grand nombre de publications ont montré l'intérêt d'utiliser des analyses fractales pour caractériser les tissus urbains, par exemple (Longley & Mesev 1997, 2000 ; De Keersmaecker, Frankhauser, Thomas 2003 ; Tannier & Pumain, 2005 ; Thomas,

Frankhauser, De Keersmaecker 2007 ; Thomas, Frankhauser, Biernacki 2008 ; Feng & Chen, 2010 ; Chen, 2011).

Au départ, la résolution spatiale des données cartographiques numériques accessibles aux chercheurs (images issues de la télédétection ou bien cartes papier digitalisées puis rasterisées) était assez grossière, les pixels des images ayant le plus souvent une largeur de 100 à 200 m. de côté. A partir des années 2000 environ, les chercheurs ont eu accès à des données numériques à résolution spatiale fine. Ceci, combiné aux capacités de calcul accrues des ordinateurs, a permis d'estimer des dimensions fractales de façon bien plus précise qu'auparavant, voir à ce sujet (Longley & Mesev 2000 ; Frankhauser (dir.) 2003).

Estimation de dimensions fractales⁴²

En mathématiques, la dimension mesure la taille d'un objet. On distingue fondamentalement :

- la *dimension topologique*, qui est le nombre de coordonnées nécessaires pour localiser sans ambiguïté un point de l'objet. Les dimensions topologiques sont, par construction, des nombres entiers positifs ;
- la *dimension fractale*, qui est une mesure de l'espace qu'occupe un objet autour des points qui le constitue (Falconer 1990).

Pour les objets réguliers, ces deux dimensions sont équivalentes et la dimension topologique détermine exactement le nombre de coordonnées nécessaires pour mesurer la taille de ces objets (respectivement longueur, surface et volume pour les objets unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel).

En revanche, pour les objets irréguliers, les informations fournies par la dimension topologique ne sont pas suffisantes pour mesurer leur taille. Il est en effet impossible de mesurer la taille de formes géométriques complexes, par exemple une ligne se déployant dans \mathfrak{R}^2 et non dans \mathfrak{R} , avec des méthodes de la géométrie euclidienne.

L'idée des mathématiciens pour caractériser de façon plus satisfaisante la forme de tels objets irréguliers est de considérer que seule la quantification locale de l'espace occupé est pertinente. Les dimensions fractales ainsi définies ne sont plus directement reliées à un système de coordonnées. En contrepartie, elles décrivent finement l'irrégularité des objets et peuvent être utilisées comme indicateurs morphologiques dans des analyses statistiques (comparaison, classification et régression).

En théorie mathématique, pour calculer une dimension fractale, on commence par recouvrir un ensemble de points dans son espace d'inscription (le plus souvent, \mathfrak{R}^1 , \mathfrak{R}^2 ou \mathfrak{R}^3), au moyen de "parties" (*hyperballs*), chacune ayant un diamètre quelconque inférieur à une valeur donnée δ . Il existe une infinité de recouvrements possibles répondant à cette règle. Pour chacun, on calcule la somme Σ_δ^d des diamètres des parties du recouvrement, chaque diamètre de parties étant porté à la puissance d . L'exposant d est en fait une dimension. Il peut prendre une infinité de valeurs dans un intervalle donné (par exemple, l'intervalle [1 ; 2] pour le recouvrement d'une ligne inscrite dans \mathfrak{R}^2). Ensuite, pour chaque couple de valeurs δ et d , on identifie le recouvrement pour lequel la somme des parties Σ_δ^d est la plus petite possible, notée ici simplement $\inf \Sigma_\delta^d$. On répète ceci une infinité de fois, pour des valeurs de δ à chaque fois plus petites et qui tendent vers 0. La mesure de Hausdorff

42 La rédaction de cette section a bénéficié des nombreux échanges que j'ai eus avec F. Sémécurbe, ingénieur statisticien à l'INSEE (Paris) et doctorant au laboratoire THÉMA (Besançon) au moment de la rédaction de ce mémoire.

H^d de l'ensemble de points à la dimension d est la valeur limite de $\inf \Sigma_\delta^d$ quand δ tend vers 0. Quand H^d est égale à 0, ceci signifie que la dimension de l'ensemble de points est inférieure à d . La dimension de Hausdorff D_H correspond à la valeur de d pour laquelle la limite de la mesure de Hausdorff H^d est la plus petite possible sans toutefois être égale à 0. Ainsi, D_H représente la "bonne" dimension, celle à laquelle la mesure de l'objet sera parfaitement exacte⁴³.

En pratique, la dimension de Hausdorff est impossible à calculer. L'idée est donc de l'approximer. A cet effet, le point de départ est de dénombrer les éléments d'un objet ou d'une distribution spatiale (points, pixels, bâtiments, segments de routes...) présents dans des voisinages de taille croissante ou décroissante, et emboîtés hiérarchiquement. Deux éléments varient en fonction de l'étape de comptage : le nombre d'éléments dénombrés N et la taille du voisinage ε . On peut ainsi construire une courbe qui met en relation N et ε . Pour des objets théoriques mathématiques, la dimension fractale D correspond au comportement asymptotique de N quand ε tend vers 0. Pour des objets du monde réel, D est estimée pour des intervalles de valeurs de ε suffisamment larges, pour lesquels la courbe empirique correspond à une loi de puissance⁴⁴, par exemple :

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^D \text{ ou } N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D} \text{ ou } N(\varepsilon) \sim a\varepsilon^D + c \quad (5)$$

Selon la définition du voisinage ε considéré, c'est-à-dire la méthode adoptée pour recouvrir l'objet étudié, et selon la méthode choisie pour obtenir $N(\varepsilon)$, c'est-à-dire pour obtenir la somme des parties de l'objet recouvertes, on obtient différentes dimensions fractales⁴⁵. Les différentes dimensions ne sont pas toutes sensibles aux mêmes types d'irrégularités spatiales et caractérisent donc des aspects également différents d'une configuration spatiale. Le choix d'une dimension ou d'une autre dépend à la fois des propriétés de l'objet étudié et de celles que le chercheur souhaite analyser⁴⁶.

La dimension la plus simple à calculer est la dimension de boîte (*box-counting dimension*). Le procédé consiste à disposer dans l'espace un nombre minimum de boîtes d'une taille donnée qui permettent de recouvrir tous les éléments de la distribution spatiale. Le plus souvent, on simplifie le procédé en recouvrant l'espace d'une grille régulière (carrée ou rectangulaire) et en comptant le nombre de carreaux de la grille (ou boîtes) comportant au moins un élément. La taille des carreaux de la grille est augmentée (ou diminuée) pas à pas d'un certain facteur et le nombre de carreaux occupés augmente (ou diminue)⁴⁷. Sur cette base, on construit un graphique en coordonnées double logarithmiques comprenant le nombre de carreaux occupés en ordonnées et la taille des carreaux en abscisses. On ajuste ensuite cette courbe empirique au moyen d'une droite dont la pente est la dimension fractale D (cf. Figure 43). On contrôle la qualité statistique de l'ajustement et on vérifie que la courbe estimée comporte un nombre suffisant de points (égal à 13 dans la Figure 43), chacun

43 Pour une définition mathématique rigoureuse de la mesure et de la dimension de Hausdorff, voir l'ouvrage de K. Falconer (1990).

44 Ce faisant, les égalités ou inégalités entre dimensions, prouvées en considérant un comportement asymptotique de N quand ε tend vers 0, peuvent ne plus être valables.

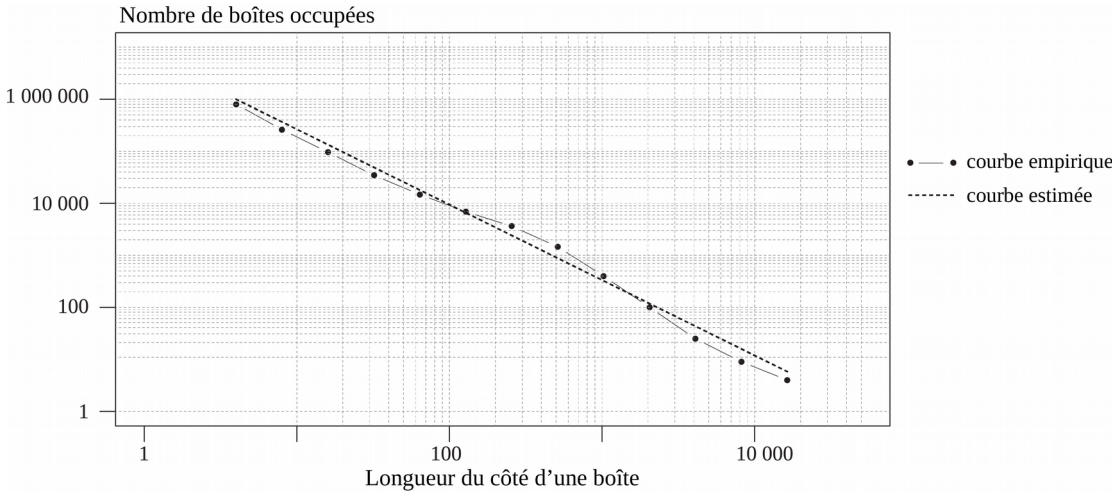
45 Pour une description des méthodes classiques de calcul des dimensions fractales, voir J. Theiler (1990).

46 On constate souvent que le choix d'une dimension ou d'une autre ne prend pas en compte ces deux aspects et que, par conséquent, les implications de ce choix concernant l'interprétation des résultats d'analyse ne sont pas non plus prises en compte.

47 Considérant successivement chaque taille de carreaux, on peut positionner la grille de plusieurs manières différentes et sélectionner la position de la grille pour laquelle le nombre de carreaux occupés est minimal.

correspondant à une taille de carreaux, et un intervalle de tailles de carreaux assez large (au moins trois ordres de magnitude).

Figure 43. Estimation de la dimension fractale : exemple du *box-counting*. La pente de la droite d'estimation donne la dimension fractale. Reprendre la figure. Voir unité taille de boîte.



Une autre famille de dimensions fractales consiste à dénombrer le nombre d'éléments *conjointement présents* dans des voisinages (de forme circulaire en général) de taille croissante. Ces dimensions fractales sont dites de deuxième ordre, contrairement aux dimensions de boîte qui sont de premier ordre. Formellement, on définit M_r , où r correspond à ε et M correspond à N .

$$M_r \sim r^D \quad (6)$$

M est la somme, ou la moyenne, ou une agrégation quelconque du nombre d'éléments présents dans le voisinage de chaque élément pris séparément, qu'on note e . $M_r(e)$ est le nombre d'éléments situés à une distance r autour de e . On obtient M_r en agrégeant les $M_r(e)$ de l'ensemble des points e . Quand une moyenne arithmétique est utilisée pour l'agrégation, la dimension fractale obtenue est la dimension de corrélation (Grassberger & Procaccia 1983) (équation 7).

$$M_r = \left[\frac{1}{n} \sum_e M_r(e) \right] \sim r^{D_2} \quad (7)$$

Quand une autre norme mathématique est utilisée pour l'agrégation (équation 8), la dimension fractale est une dimension généralisée (multifractale) D_q (voir section 1.3 de ce chapitre) calculée selon la méthode *sandbox* (Vicsek 1990).

$$M_r^q = \left[\frac{1}{n} \sum_e M_r(e)^{q-1} \right]^{\frac{1}{q-1}} \sim r^{D_q} \quad (8)$$

Le paramètre q contrôle la nature de l'agrégation : davantage d'importance est accordée à des valeurs élevées de $M_r(e)$, quand q est élevé, ou bien à de faibles valeurs de $M_r(e)$, quand q est faible. Quand q est égal à 0, les valeurs $M_r(e)$ ont toutes la même importance. Quand q est égal à 2, on retrouve la dimension de corrélation de P. Grassberger et I. Procaccia (1983).

Quelle que soit la méthode adoptée, la taille de voisinage la plus petite (respectivement la plus grande) en-deçà (respectivement au-delà) de laquelle l'estimation d'une dimension fractale perd tout son sens, est celle à partir de laquelle l'objet mesuré n'est plus auto-similaire (Baveye & Boast 1998).

« (...) ces processus ne se déploient pas à l'infini à la surface de la terre, d'où l'apparition de seuils entre des formes de structuration (ou de remplissage) de l'espace géographique, certaines qui présentent des variations systématiques selon l'échelle, selon une dimension fractale donnée, et d'autres qui sont indépendantes de l'échelle. Toute mesure empirique de dimension fractale met ainsi en évidence un domaine de validité de la structure identifiée, entre généralement un seuil inférieur et un seuil supérieur en deçà ou au-delà desquels la dimension fractale change ou ne peut plus être établie » (Pumain 2010a).

Le niveau de résolution des sources d'information interfère en outre avec la détermination du domaine de validité de la fractalité des structures.

« En effet, puisque la mesure de dimension fractale consiste à dénombrer les sites occupés par un type d'objet donné dans des boîtes de taille de plus en plus réduite, ce comptage devient impossible dès lors que l'échelle du document cartographique support ne laisse pas discerner les pleins et les vides ou les segments de réseau à très grande échelle » (Pumain 2010a).

Bien qu'approximatives, en raison de la petitesse relative de l'intervalle d'échelles pour lequel les objets géographiques peuvent être auto-similaires, et empreintes de subjectivité quant au choix des fonctions et paramètres d'estimation, les mesures de dimension fractale sont intéressantes en géographie car elles permettent de caractériser des répartitions spatiales très hétérogènes. En effet, on constate une hétérogénéité fondamentale de la répartition spatiale des implantations humaines (bâtiments, logements, population...). *« la dimension fractale étant déterminée à partir des comptages effectués selon différents niveaux de résolution d'une distribution spatiale, ce calcul met en évidence des variations systématiques de la répartition d'un fait géographique donné à travers les échelles. Ces variations sont non proportionnelles, non linéaires, elles n'apparaîtraient pas si on se contentait de mesures plus simples des répartitions comme celle des densités, si souvent employée dans la géographie classique (...) » (François, Frankhauser, Pumain 1995) (Figure 44).*

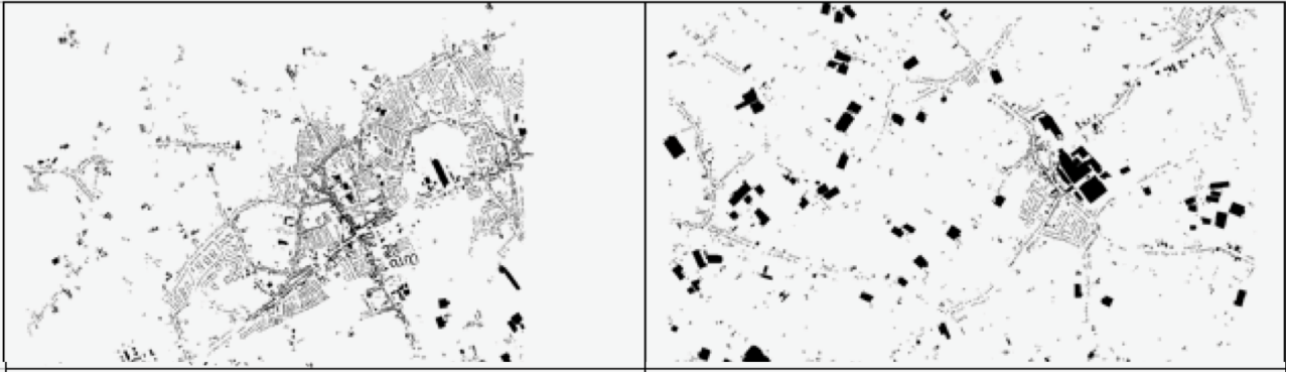
L'adaptation des mesures de dimensions fractales à l'étude de répartitions spatiales très inégalement concentrées résulte du fait que le support de la mesure est la forme de l'objet mesuré lui-même : une dimension fractale mesure le changement de l'objet vis-à-vis de lui-même en changeant d'échelle. Inversement, quand on mesure une densité, le support de la mesure est l'espace support de l'objet mesuré, c'est pourquoi les mesures de densité supposent une répartition homogène des éléments dans l'espace ainsi qu'une relation linéaire, de proportionnalité, entre population et surface. Quand on calcule des indices de concentration (indice de Gini, indice de Hoover, indice de Duncan...), on mesure un écart à une distribution aléatoire.

En 1996, A. Bretagnolle a écrit :

« (...) à ce jour, il n'existe aucune mesure satisfaisante de l'état ou du processus de concentration d'une population. L'indicateur le plus utilisé par les géographes est l'indice de Gini, associé à la courbe de Lorenz, qui date du début du siècle. (...) Les indices de concentration de la population figurent pourtant parmi les premières tentatives de quantification en géographie (citons, par exemple, les travaux d'Albert Demangeon dans les années 1920), mais les auteurs butent sur le problème essentiel de la recherche d'une mesure qui puisse caractériser une distribution spatiale ou un écart entre deux distributions ».

Avec les mesures de dimensions fractales, certaines limites des indicateurs classiques de concentration peuvent être dépassées.

Figure 44. Deux communes belges : même densité bâtie, différentes dimensions fractales. (Dimension fractale de corrélation estimée avec Fractalyse 2.4⁴⁸. $D_{\text{cor}} = 1.72$ à gauche, $D_{\text{cor}} = 1,29$ à droite). Images aimablement fournies par I. Thomas (CORE, Louvain-la-neuve, Belgique).



Pour des objets fractals construits de manière récursive, admettant une variation stochastique de la position des éléments du générateur les uns par rapport aux autres, la densité diminue au fur et à mesure que la résolution spatiale devient plus fine. Cette diminution de la densité est d'autant plus marquée que la dimension fractale est faible (Tannier, Vuidel, Houot, Frankhauser 2012). Le rapport entre la densité ρ_i mesurée à une résolution spatiale i et la densité ρ_{i+1} à une résolution spatiale plus fine $i+1$ est lié à la dimension fractale D selon la relation :

$$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} = (r)^{(-2-D)} \quad (9)$$

où r est le facteur de réduction de la taille d'un élément d'une résolution spatiale donnée à une résolution spatiale plus fine (Tableau 25). Cette relation rappelle une autre relation qui relie la diminution de la densité bâtie du centre vers la périphérie des villes à leur dimension fractale radiale (Fotheringham, Batty, Longley 1989 ; Batty & Kim 1992 ; Thomas, Frankhauser, De Keersmaecker 2007 ; Chen 2009).

Tableau 25. Diminution de la densité bâtie ρ en fonction de la dimension fractale D quand la taille de chaque élément est réduite d'un facteur r égal à $1/3$ entre i et $i+1$.

Dimension fractale D	$\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i}$
1.26	0.44
1.46	0.55
1.63	0.67
1.77	0.78

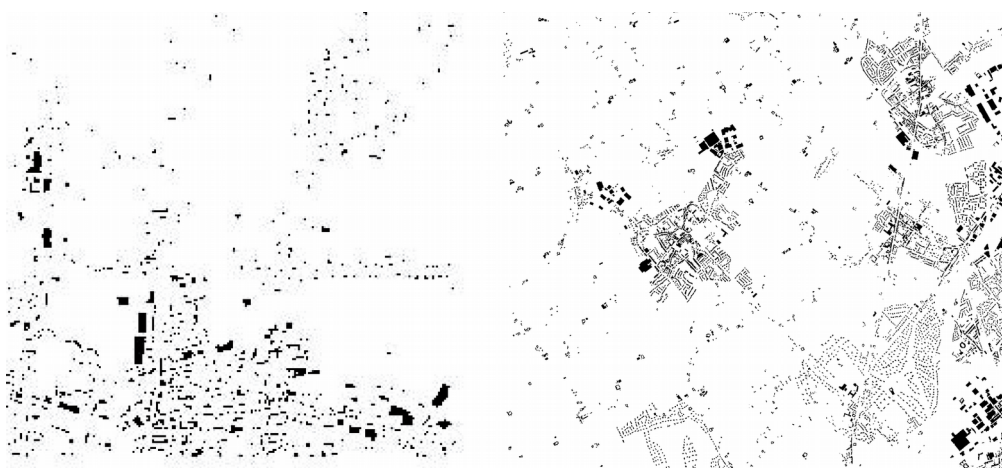
48 Vuidel G., Frankhauser P., Tannier C. (2006). *Fractalyse 2.4*. Logiciel téléchargeable librement : <http://fractalyse.org/>

Extraction de l'enveloppe morphologique des agglomérations urbaines au moyen d'une approche fractale

« *the dimmed outlines of phenomenal things all merge into one another unless we put on the focussing glass of theory* » (Harman 2009) cité dans (Batty 2013).

Depuis des décennies, la délimitation des agglomérations urbaines représente un défi tant pour la gestion et l'aménagement urbain, afin de déterminer le périmètre d'application des lois et des taxations, que pour les études scientifiques, dans le but de mener des comparaisons diachroniques et internationales. On constate l'absence de consensus quant aux critères de délimitation les plus à même de répondre aux objectifs. Ces critères peuvent être soit morphologiques (proportion de différents types d'occupation du sol, densités bâties, contiguïté bâtie...), soit fonctionnels (nombre d'habitants, proportion d'actifs travaillant dans la ville centre et résidant en dehors...). Dans cette section du mémoire, nous nous intéressons uniquement aux critères de délimitation morphologiques, qui considèrent les aspects les plus pérennes des implantations humaines et dont l'utilisation requiert relativement peu de données. « *In designing the models, it was thought important to keep the variables in the models as simple as possible and, at the same time, easily measurable* » (Batty & Longley, 1986).

Figure 45. Deux exemples de tissus bâtis caractéristiques de franges périurbaines. Source : P. Frankhauser (2008).



(a) Frange périurbaine Nord de la ville de Besançon (Est de la France)

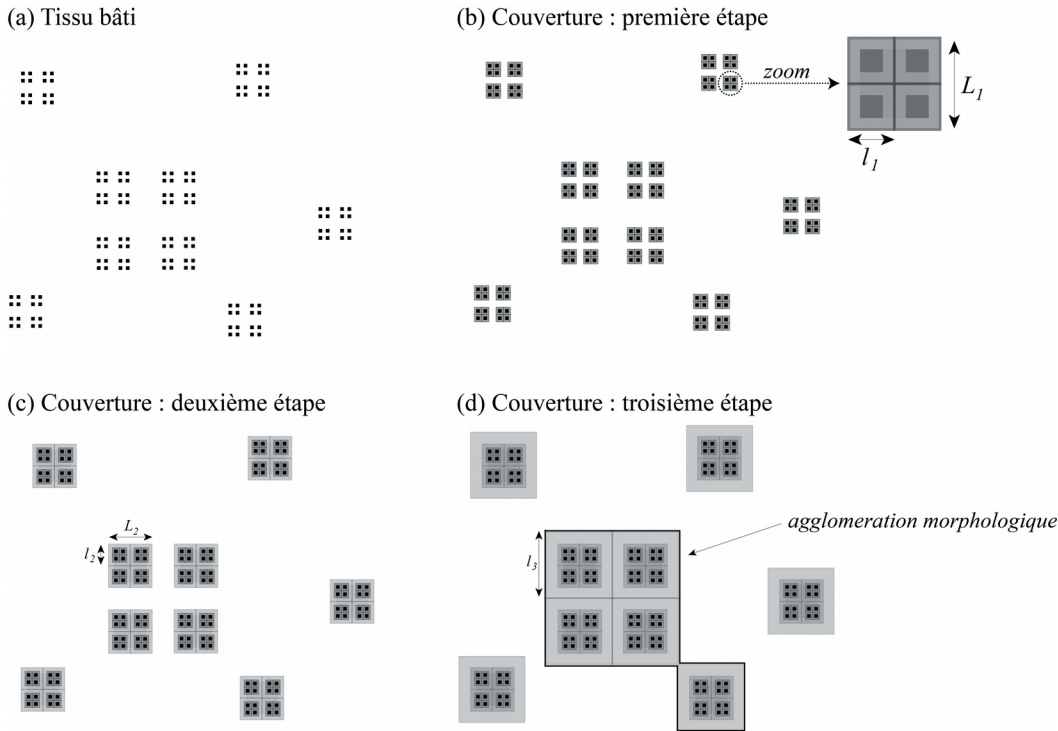
(b) Frange périurbaine Ouest de la ville de Lille (Nord de la France)

Les méthodes habituelles de délimitation des agglomérations urbaines à partir de critères morphologiques consistent en des classifications d'images de télédétection ou de photographies aériennes, qui intègrent une contrainte de contiguïté entre les objets classés comme "urbains", en général sous la forme un seuil de distance défini *a priori*, voir par exemple (Donnay 1994 ; Bailly 1996 ; Weber 2001). Cependant, à un niveau d'analyse assez fin, les délimitations résultantes sont peu satisfaisantes dans les franges périurbaines car les tissus bâtis présentent des espacements entre bâtiments extrêmement variables (Figure 45).

Suivant l'idée que l'analyse de phénomènes géographiques à plusieurs échelles permet d'identifier des discontinuités spatiales cruciales (Lam & Quattrochi 1992), nous avons proposé une méthode basée sur l'hypothèse de fractalité des tissus bâtis intra-urbains, qui permet d'identifier l'enveloppe morphologique des agglomérations urbaines. Celle-ci est définie comme le contour d'un agrégat de

bâtiments dont la logique de répartition spatiale se différencie nettement de celle alentours. Les données utilisées pour réaliser cette délimitation consistent en des cartes numériques représentant l'emprise au sol des bâtiments en 2D.

Figure 46. Identification d'un changement majeur dans la concentration des bâtiments à travers les échelles au moyen d'un procédé de couverture.



Prenons l'exemple d'un tissu bâti très schématisé, dans lequel les bâtiments sont tous des carrés identiques (Figure 46a). La distance λ qui sépare les bâtiments les plus proches les uns des autres est la même que la longueur du côté de chaque bâtiment. On peut couvrir chaque bâtiment au moyen d'un carré de plus grande taille choisi de manière à ce que les carrés les plus proches se touchent les uns les autres sans se chevaucher (Figure 46b). La longueur des carrés de couverture est égale à $l_1 = 2 \lambda$. Les carrés de couverture les plus proches se touchent et forment des agrégats de longueur $L_1 = 2 l_1$. Le nombre de carrés de couverture de taille l_1 est égal à $1/4$ du nombre de bâtiments l .

A la deuxième étape de couverture (Figure 46c), chaque agrégat L_1 est couvert d'un carré plus grand de taille $l_2 = 2 l_1 + 2 \lambda = L_1 + l_1$. Comme la distance qui sépare les agrégats L_1 les plus proches est égale à la longueur l_1 , les carrés de couverture l_2 les plus proches se touchent et forment des agrégats de taille $L_2 = 2 l_2$. Le nombre d'agrégats de taille L_2 est égal à $1/4$ du nombre d'agrégats L_1 ⁴⁹.

49 Soit N_1 et N_2 le nombre d'agrégats bâtis à la première et deuxième étape de couverture, respectivement, et L_1 et L_2 la longueur du côté d'un agrégat bâti à la première et deuxième étape de couverture, on obtient :

$$\frac{N_2}{N_1} = N \quad \text{et} \quad \frac{L_2}{L_1} = v$$

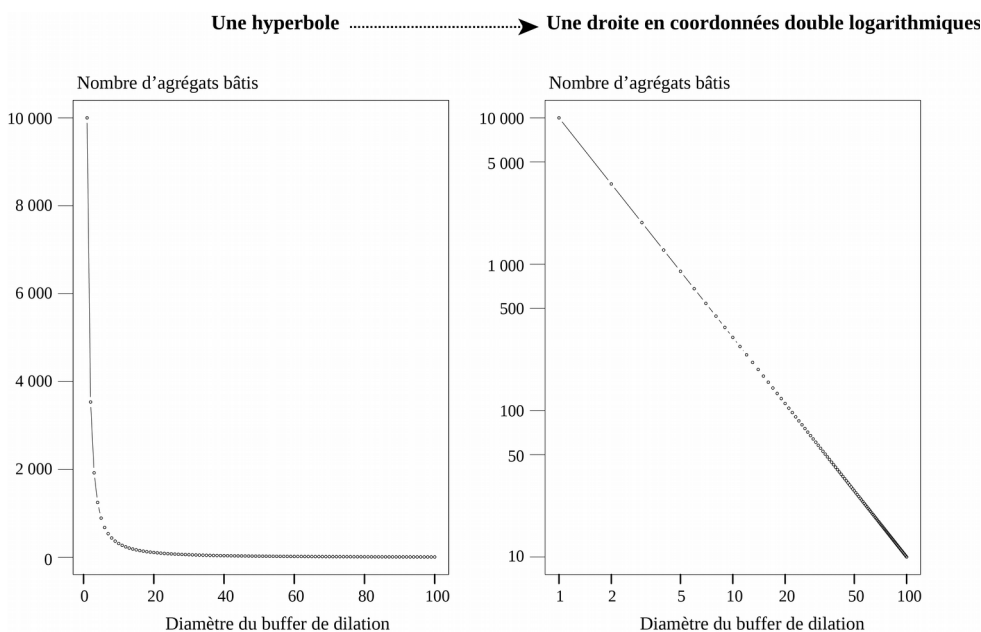
On peut sur cette base calculer la dimension d'auto-similarité :

$$D = \frac{\log N}{\log v}$$

A la troisième étape de couverture (Figure 46d), chaque carré l_2 est couvert d'un carré plus grand de taille $l_3 = 2 l_2 + 2 \lambda = L_2 + l_2$. La distance qui sépare les agrégats L_2 les plus proches n'est pas partout égale à la longueur d'un carré l_2 . Par conséquent, les carrés de couverture l_3 les plus proches ne se touchent pas tous les uns les autres. Ce faisant, la taille des agrégats L_3 n'est pas égale à $2 l_3$ et le nombre d'agrégats L_3 n'est pas égal à $1/4$ du nombre d'agrégats L_2 . On constate donc qu'à la troisième étape du processus de couverture, les distances entre les agrégats bâtis ne suivent plus la même logique d'emboîtement d'échelles que précédemment, en certains lieux de la zone d'étude. Le processus de couverture appliqué jusqu'ici ne peut plus se poursuivre. Si le tissu bâti était auto-similaire, le processus de couverture aurait pu se poursuivre jusqu'à ce qu'un seul grand carré le couvre entièrement. L'étape à laquelle le processus de couverture s'arrête permet d'identifier une discontinuité spatiale fondamentale, sous la forme d'un seuil de distance entre les bâtiments en-deçà duquel le tissu bâti est auto-similaire et au-delà duquel il ne l'est plus. On peut dessiner l'enveloppe morphologique des agrégats bâtis ainsi constitués. On distingue un agrégat principal, qui peut représenter schématiquement à une agglomération urbaine, et des agrégats secondaires, qui peuvent correspondre à des petites villes périphériques.

En pratique, il est impossible d'utiliser un tel procédé de couverture pour extraire l'enveloppe morphologique des agglomérations urbaines car les villes ne sont pas réellement auto-similaires. Une ville n'est pas le résultat d'une construction géométrique itérative qui suit les règles d'un générateur fractal, aussi compliqué soit-il. A la place, on peut utiliser la dilatation. Celle-ci a été initialement imaginée par H. Minkowski (1903) et développée ensuite par G. Bouligand (1929). Chaque élément d'une image (par exemple, un pixel) ou d'une carte (par exemple, un bâtiment) est entouré d'une zone-tampon (*buffer*) qui s'élargit à chaque étape de dilatation. Au cours du processus, des éléments initialement séparés fusionnent et des agrégats se forment. Au fur et à mesure de l'expansion de ces agrégats, leur nombre diminue. Le processus de dilatation s'arrête quand il ne reste plus qu'un seul agrégat. On peut ensuite construire une courbe représentant la taille du buffer de dilatation en abscisse et le nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation en ordonnée. Pour des villes fractales théoriques auto-similaires, le nombre d'agrégats bâtis diminue au fil des étapes de dilatation selon une fonction hyperbolique et la courbe issue des dilatations est une droite en coordonnées double logarithmiques (Figure 47).

Figure 47. Exemple de fonction hyperbolique reliant le nombre d'agrégats bâtis à chaque étape de dilatation.



Pour des villes réelles, la courbe de dilatation présente une courbure plus ou moins marquée (Figure 48). On pose l'hypothèse que le point pour lequel la courbe de dilatation, en coordonnées double logarithmiques, dévie le plus d'une droite marque un changement crucial dans la configuration du bâti et révèle la coexistence de deux types d'organisations spatiales différentes dans la zone d'étude (Tannier, Thomas, Vuidel, Frankhauser 2011)⁵⁰. En-deçà du seuil de distance correspondant, les distances entre les bâtiments suivent une loi d'échelles. Au-delà de ce seuil, ce n'est plus le cas. Le seuil de distance correspondant à la courbure maximale de la courbe de dilatation marque la séparation entre deux sous-ensembles morphologiques bien distincts.

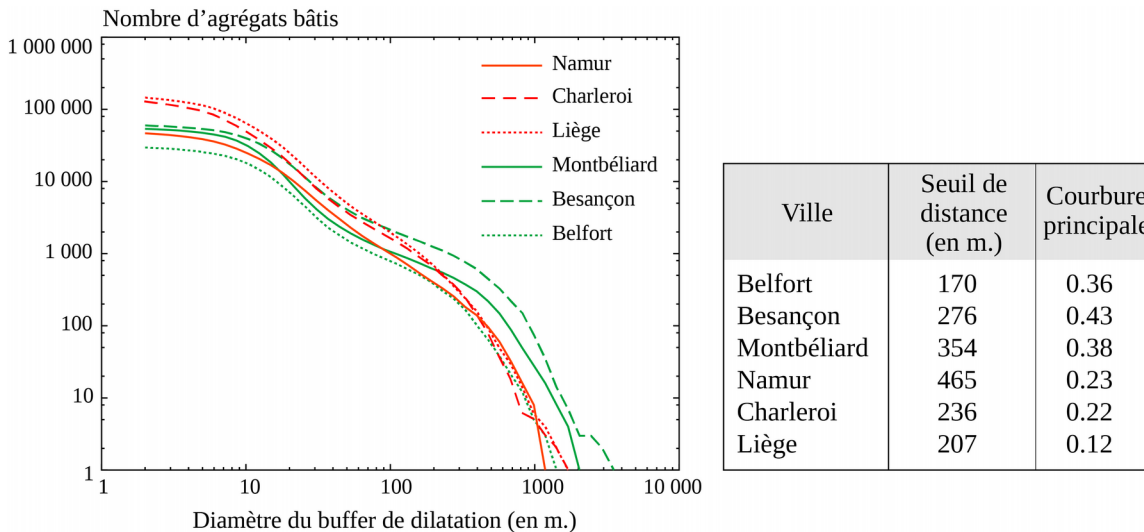
Une application informatique a été spécialement conçue pour mettre en œuvre aisément ce protocole d'analyse : MorphoLim (<https://sourcesup.renater.fr/morpholim/>).

On remarque qu'au moyen de la dilatation, on cherche à identifier une rupture dans l'invariance d'échelles des distances inter-bâtiments tandis qu'avec la couverture, on cherche à identifier une rupture dans l'auto-similarité des tissus bâtis. En effet, contrairement à la couverture, la dilatation ne permet pas de construire une fractale associée au tissu bâti étudié et ayant la même dimension d'auto-similarité. Cependant, la dilatation est directement liée à la notion de dimension fractale (Mandelbrot, 1982). L'inconvénient principal de la dilatation vis-à-vis de la couverture est la dépendance du seuil de distance identifié à l'emprise spatiale de la zone d'étude considérée car chaque seuil de distance traduit une différenciation maximale entre un "dedans" donné vis-à-vis d'un "dehors" donné. Dans certains cas, il peut être plus pertinent de fixer un seuil de distance *a priori* qui ne tient pas compte de l'organisation spatiale spécifique de chaque lieu et qui permet de s'affranchir du fait que la délimitation des agrégats bâtis soit dépendante de l'emprise spatiale de la zone d'étude considérée.

Dans l'exemple de la Figure 48 (page suivante), les villes belges se distinguent des villes françaises de par la forme de leur courbe de dilatation. En revanche, les seuils de distance ne se différencient pas par pays. Le seuil de distance est donc indépendant de la forme de la courbe de dilatation à laquelle il se rapporte. Moins une agglomération morphologique diffère de son environnement bâti (en termes de variations des distances séparant les bâtiments les uns des autres), plus le seuil de distance est grand. Moins les bâtiments sont connectés à travers les échelles, plus le seuil de distance est grand. L'exemple de deux formes fractales strictement auto-similaires, la poussière de Fournier et le tapis de Sierpinski, aide à comprendre ceci. La poussière de Fournier est composée d'éléments non connexes à travers les échelles tandis que, dans un tapis de Sierpinski, les éléments sont connexes. Les villes européennes combinent en général des caractéristiques des poussières de Fournier et des tapis de Sierpinski, du point de vue de la connexité entre les bâtiments (Thomas, Frankhauser, De Keersmaecker 2007). Si une agglomération est plus proche d'un tapis de Sierpinski que d'une poussière de Fournier et, en même temps, bien différente de son environnement bâti, le seuil de distance sera bas (cas de Belfort par exemple). Si au contraire elle est plus proche d'une poussière de Fournier que d'un tapis de Sierpinski et que son tissu bâti se différencie assez peu de celui de son environnement, alors le seuil de distance qui la caractérise sera élevé (cas de Namur par exemple).

50 On ignore la courbure existant souvent au début des courbes de dilatation et correspondant à des diamètres de buffer inférieurs à 10 ou 20 m., car les distances inter-bâtiments concernées correspondent alors simplement à la largeur des rues. On ignore aussi d'éventuelles courbures existant pour des diamètres de buffer supérieurs à 1 km car les distances concernées sont au-delà des ordres de grandeur des distances caractéristiques des agglomérations morphologiques.

Figure 48. Courbes de dilatation de six aires urbaines de tailles comparables. Extrait de (Tannier, Thomas, Vuidel, Frankhauser 2011). Sources des données : pour les villes françaises, BD Topo ® IGN 2009 ; pour les agglomérations belges, Plan de Localisation Informatique (PLI) du Ministère de la Région Wallonne, Direction générale opérationnelle Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie (2004).



Spectre multifractal et dimensions généralisées : caractérisation quantitative du MAUP (Modifiable Areal Unit Problem)

Le MAUP implique que les états de concentration ou de dispersion observés dépendent de la taille des unités spatiales élémentaires considérées, de leur forme et de leur positionnement, ainsi que de la délimitation de la zone d'étude (voir chapitre 1, section 1.2). Si le MAUP consiste en un changement régulier et proportionnel de concentration d'un phénomène donné à travers les échelles (à savoir, des voisinages ou des résolutions spatiales emboîtées hiérarchiquement), donc si le MAUP a la propriété d'invariance d'échelles, il est possible de le quantifier en trouvant la loi de puissance qui le décrit au mieux. Mais il se peut aussi qu'il n'ait aucune propriété d'invariance d'échelles. Par exemple en France, on observe une croissance de la densité de population en passant de la région, au département puis à la commune, mais celle-ci n'est pas régulière car les régions n'ont pas toutes la même superficie, de même que les départements ou les communes. De plus, pour un même niveau hiérarchique, on observe souvent que les unités spatiales les plus peuplées sont de plus petite superficie que les moins peuplées et que ceci peut être représenté sous la forme d'une loi de puissance dont l'exposant est inférieur à 1 (Haggett 1973) cité dans (François, Frankhauser, Pumain 1995).

On choisit de s'intéresser ici uniquement au MAUP résultant de lois d'échelles dans la distribution spatiale des implantations humaines. On part de l'observation que, dans un certain nombre de cas, le MAUP ne se traduit pas par une invariance d'échelles simple mais résulte d'une série de lois d'échelles imbriquées les unes avec les autres. En effet, différents auteurs ont suggéré que les tissus urbains intègrent un ensemble de caractéristiques fractales (Batty & Longley 1994 ; Frankhauser 2008), expliquant ainsi le fait qu'une seule et unique dimension fractale puisse ne pas les décrire correctement. Dans ce cas, il peut être intéressant de mener des analyses multifractales, dont le principe fondamental est qu'une distribution spatiale peut présenter différentes caractéristiques auto-similaires imbriquées les unes avec les autres.

Sûrement en raison d'un formalisme mathématique assez compliqué, l'analyse multifractale a fait jusqu'ici l'objet de peu d'applications en géographie. G. Haag (1994) et Y. Chen et Y. Zhou (2004) l'ont utilisée pour caractériser des systèmes de villes et la distribution rang-taille de systèmes de peuplement. Y. Chen et J. Wang (2013) l'ont utilisée pour caractériser le tissu urbain de Pékin à différentes dates. A. Ariza-Villaverde, F. Jiménez-Hornero et E. Gutiérrez de Ravé (2013) l'ont utilisée pour caractériser des réseaux de rues et P. Pavón-Domínguez, A. Ariza-Villaverde, A. Rincón-Casado, E. Gutiérrez de Ravé, F. Jiménez-Hornero (2017) pour caractériser un réseau de transports en commun. Seules trois études ont fait appel à l'analyse multifractale pour caractériser de la distribution spatiale d'une population (Appleby 1996 ; Orozco, Golay, Kanevski 2015 ; Sémécurbe, Tannier, Roux 2016).

Tandis que l'analyse monofractale est appliquée à des données représentant la présence ou l'absence d'un phénomène donné (images binaires), l'analyse multifractale s'applique à des données représentant la *quantité* du phénomène en chaque lieu de l'espace considéré. Elle consiste en quelque sorte en une extension de l'analyse monofractale car elle prend en compte non seulement une série de résolutions spatiales (ou de voisinages) emboîtés hiérarchiquement, comme le fait une analyse monofractale, mais aussi une *série de points de vue* sur la quantité contenue dans chaque unité spatiale. Pour ce faire, un coefficient q est introduit dans la formalisation du calcul des dimensions multifractales généralisées D_q (cf. équation 8 et commentaire associé).

Dans l'équation 8 (page 124), le calcul des dimensions généralisées D_q est basé sur le comptage d'éléments conjointement présents dans des voisinages. Ici, nous nous intéressons à une autre formalisation basée sur une logique de comptage d'éléments dans des boîtes (*box-counting*). Ces boîtes sont en fait des cellules d'une grille carrée, appelée par convention δ -grille⁵¹. δ correspond à ϵ dans l'équation 5 et à r dans l'équation 8. La longueur δ du côté de chaque cellule décroît donc itérativement. On définit $\mu_{\delta,i}$ la mesure de la quantité du phénomène considéré dans une cellule i de la δ -grille, par exemple, un nombre d'habitants.

Sur cette base, la formule du calcul des dimensions généralisées D_q est la suivante :

$$D_q = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{1-q} \log \left[\sum_{i=1}^n (\mu_{\delta,i})^q \right]}{-\log(\delta)} \quad (12)$$

Par convention, $0^q = 0$ quel que soit q appartenant à \mathfrak{R} .

Le coefficient q agit comme un filtre dans le calcul des dimensions D_q . Pour $q \rightarrow +\infty$, seules les cellules comprenant une grande quantité du phénomène considéré participent à la valeur de D_q . Inversement, pour $q \rightarrow -\infty$, les dimensions généralisées décrivent la distribution spatiale des cellules contenant une petite quantité du phénomène. Pour $q = 1$, la contribution des cellules à la valeur de D_q ne varie pas en fonction de la quantité qu'elles contiennent. Pour $q = 0$, la dimension généralisée ne tient pas compte de la quantité contenue dans chaque cellule ; seul le fait que les cellules soient peuplées ou non est considéré (D_0 correspond donc à la dimension de boîte décrite en section 1.2, Figure 43). Grâce au filtrage opéré par q , les dimensions généralisées D_q caractérisent la distribution spatiale d'une population de manière à la fois multi-échelles (via l'introduction de la δ -grille) et multi-points de vue (via le coefficient q). En faisant varier la longueur δ des cellules, on analyse la répartition spatiale des habitants à travers une série de partitions spatiales emboîtées

51 Comme toutes les cellules de la grille sont identiques, on ne tient donc pas compte du cas de MAUP résultant d'une variation de la forme des unités spatiales.

hiérarchiquement. En modifiant le filtre q , on considère soit des lieux présentant de fortes concentrations d'habitants, soit des lieux de faibles concentrations d'habitants.

Le numérateur de l'équation 12 correspond en fait à l'entropie généralisée de A. Renyi (1970) (Appleby 1996). Ainsi, quand q tend vers 1, la dimension généralisée converge vers la dimension d'information. Quand $q = 0$, la dimension généralisée D_0 correspond à la dimension fractale de boîte des cellules de la grille comportant des habitants. Quand $q = 2$, la dimension généralisée D_2 correspond à la dimension de corrélation, estimée ici au moyen de boîtes et non de voisinages comme dans l'équation 7.

Pour caractériser le MAUP d'une distribution spatiale de population, on utilise un formalisme dérivé des dimensions généralisées, appelé "spectre de singularité" et noté $f(\alpha(q))$ (Chhabra & Jensen 1989).

$$\alpha(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n P_q(\delta, i) \log(\mu_{\delta, i})}{-\log(\delta)} \quad (13)$$

$$f(\alpha(q)) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n P_q(\delta, i) \log(P_q(\delta, i))}{-\log(\delta)} \quad (14)$$

Avec

$$P_q(\delta, i) = \frac{(\mu_{\delta, i})^q}{\sum_{i=1}^n (\mu_{\delta, i})^q} \quad (15)$$

Pour simplifier, le spectre de singularité est noté $f(\alpha)$ dans la suite du mémoire. La valeur maximale de $f(\alpha)$ est égale à D_0 .

Le spectre de singularité $f(\alpha)$ permet de caractériser quantitativement le MAUP. Quand il est réduit à un point de coordonnées (2, 2), la population est répartie spatialement de façon uniforme : les densités de population sont quasi constantes localement. Dans ce cas, l'effet du MAUP est faible, voire absent. Quand le spectre n'est pas réduit au point de coordonnées (2, 2), la valeur maximale de $f(\alpha)$ est toujours inférieure à 2 et la distribution spatiale de la population est sujette au MAUP. Deux phénomènes peuvent se produire :

1. *Forme du contenant (répartition spatiale des cellules comportant des habitants)* : plus la valeur maximale de $f(\alpha)$ est faible, plus la forme du support de la mesure $\mu_{\delta, i}$ (c'est-à-dire de l'ensemble des cellules "habitées") est irrégulière et plus le nombre de cellules vides de la δ -grille est grand pour de petites valeurs de δ . En conséquence, le MAUP relatif à la forme du contenant est fort.
2. *Hétérogénéité du contenu* : deux mesures ayant la même valeur maximale de $f(\alpha)$ peuvent avoir une multifractalité plus moins intense. Elle est faible quand le spectre de singularité se concentre autour de α_0 : seul le support de la mesure (*i. e.* le contenant) crée le MAUP mais les densités de population varient peu entre les cellules de la δ -grille. Dans ce cas, la distribution spatiale de la population est quasiment monofractale. Inversement, un large spectre de singularité est le signe d'une forte multifractalité et le MAUP résulte à la fois de la forme du contenant et de l'hétérogénéité du contenu.

2. Intérêts et limites des analyses fractales de la concentration et de la dispersion des implantations humaines : quelques illustrations

Cette section du mémoire vise à fournir un panorama large mais non exhaustif de différents types d'analyses fractales, et de discuter de leurs mérites et limites respectifs. Les analyses présentées ici concernent essentiellement les formes urbaines bâties et non celles des réseaux routiers ou d'alimentation (eau, électricité...), bien que ceux-ci conditionnent en partie la concentration et la dispersion des implantations humaines.

2.1 Typologie de distributions spatiales en fonction de leur spectre multifractal

Considérant l'ensemble du territoire de France métropolitaine, nous avons appliqué l'analyse multifractale à des données de population carroyées à 200 m. fournies par l'INSEE pour l'année 2010 (Sémécurbe, Tannier, Roux 2016). La longueur du côté de chaque cellule de la δ -grille était comprise entre 800 et 6 400 m. La taille d'une unité spatiale ζ a été fixée à de 25 km de côté (Figure 49). Ce faisant, les unités spatiales ζ sont environ quatre fois plus grandes que les cellules de la δ -grille à la résolution spatiale de 6 400 m. Cinq valeurs de q ont été prises en compte : $\{0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2\}$.

Figure 49. Emboîtement hiérarchique des unités spatiales d'intérêt définies en vue de la caractérisation multifractale de la distribution spatiale de la population en France métropolitaine.

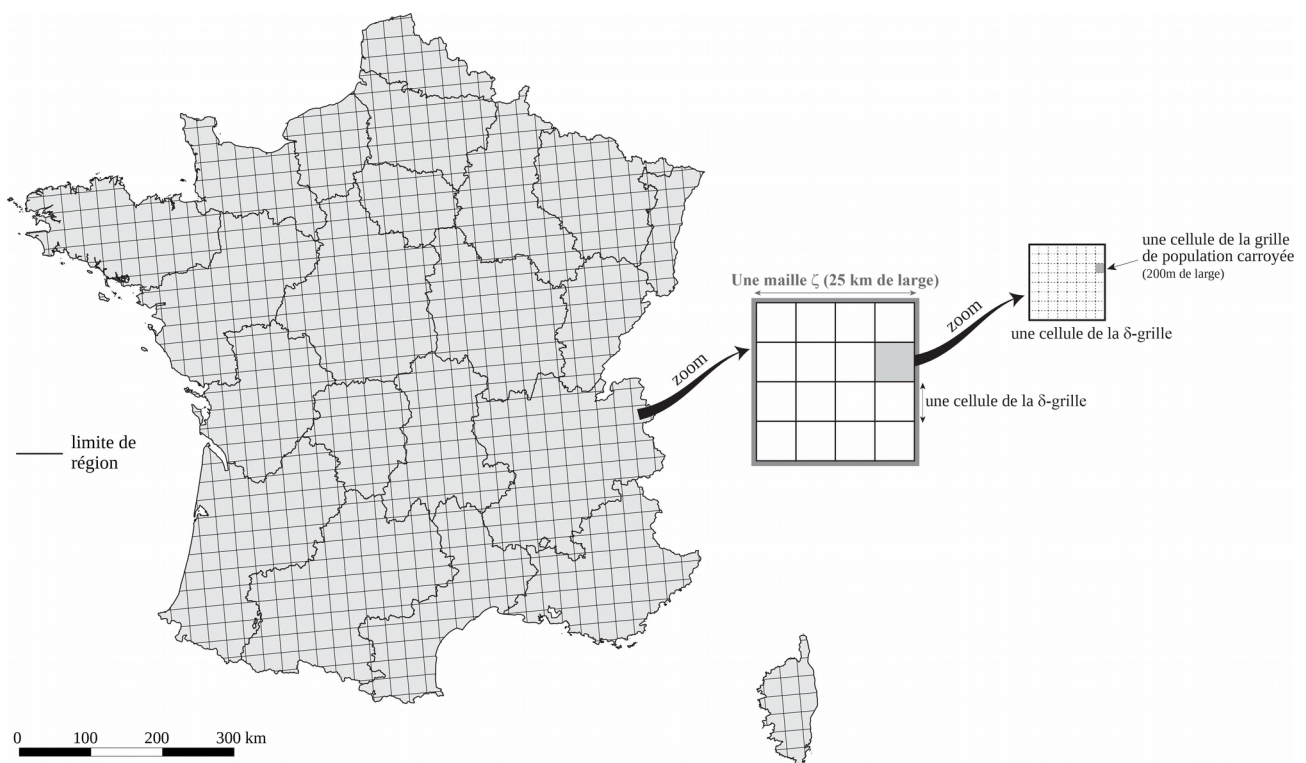
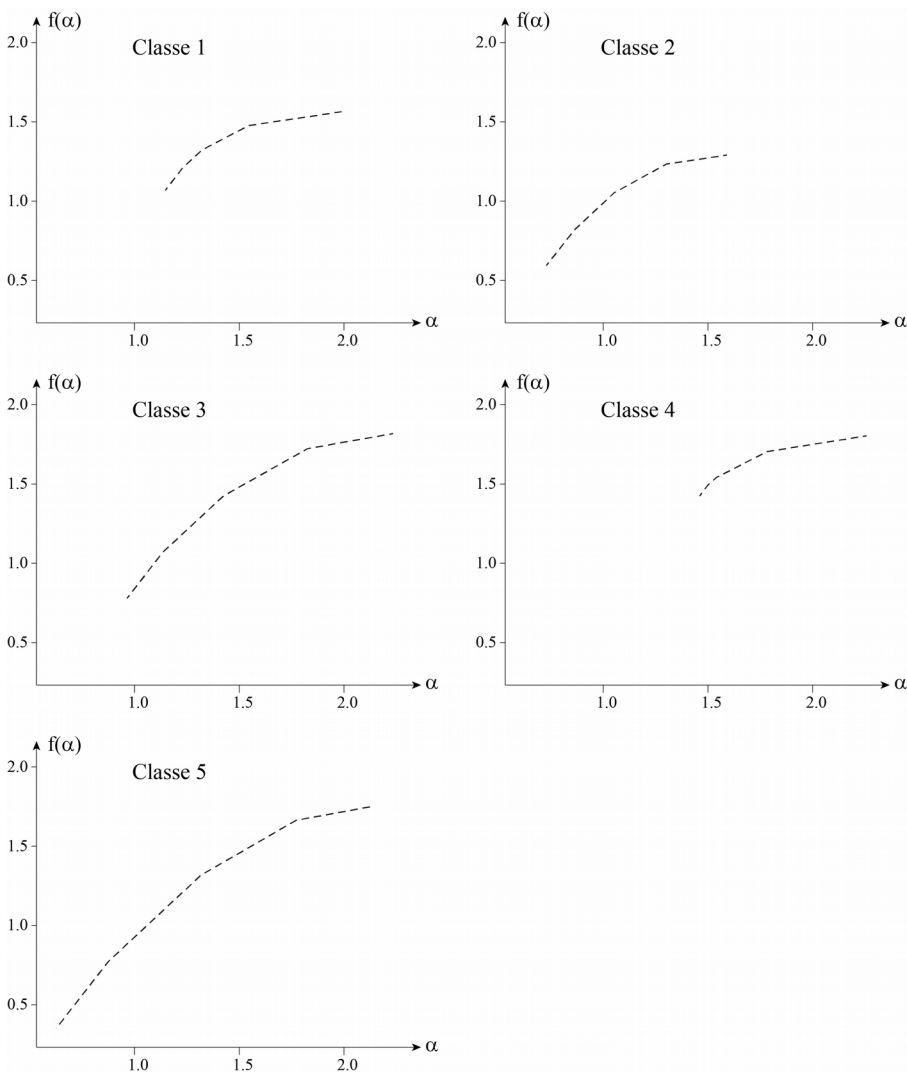


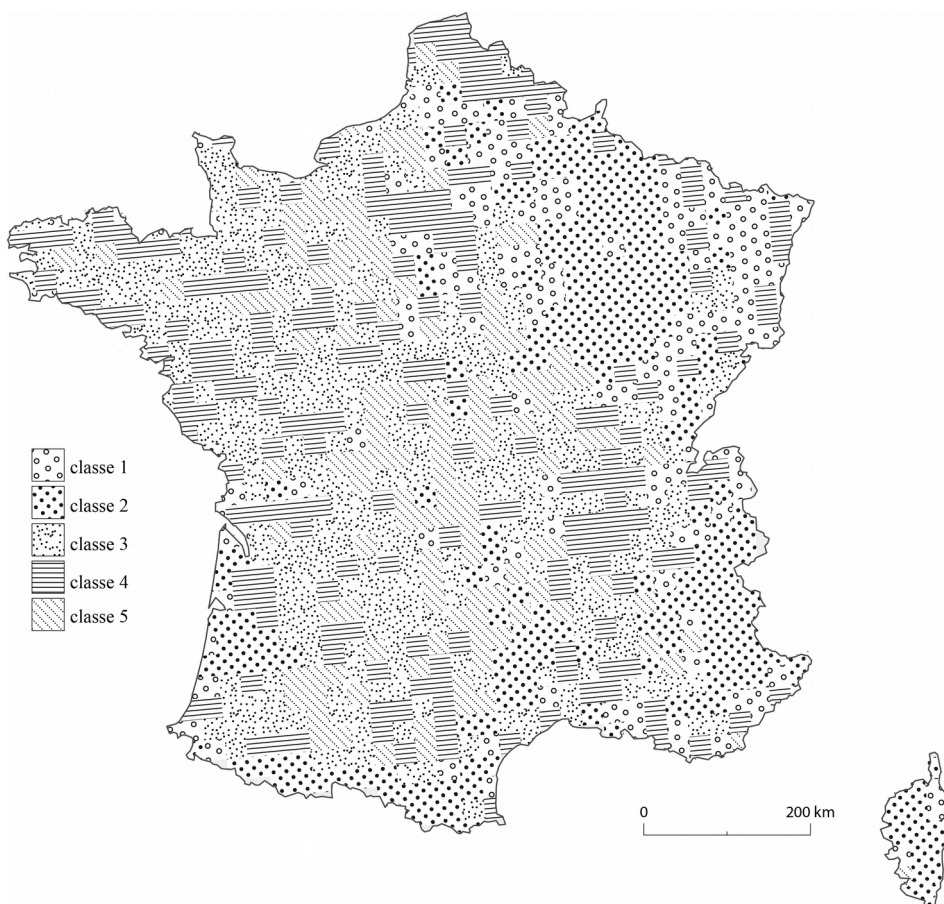
Figure 50. Spectre multifractal moyen caractérisant chacune des classes.

La classification des unités spatiales en fonction de leur spectre multifractal $f(\alpha)$ a permis d'identifier cinq classes. La Figure 50 représente le spectre de singularité moyen de chacune des classes. La classe 2 présente la plus faible valeur maximale de $f(\alpha)$, ce qui dénote un fort MAUP relatif à la forme du contenant (alternance de cellules peuplées et de cellules non peuplées variable selon les niveaux d'analyse). Comme de plus, le spectre est assez étroit, la distribution spatiale de la population tend vers une distribution monofractale. La classe 1 présente une valeur de $f(\alpha)$ maximale presque aussi faible que celle de la classe 2 mais le spectre est plus étendu : la distribution spatiale de la population est multifractale mais le MAUP résultant de la forme du contenant est plus fort que celui résultant de la forme du contenu. On observe la tendance inverse concernant la classe 3 : la valeur maximale de $f(\alpha)$ est très élevée et le spectre est très large : le MAUP résultant de la forme du contenant est presque inexistant (presque toutes les cellules sont occupées à tous les niveaux d'analyse) tandis que celui résultant de la forme du contenu est fort. Concernant la classe 4, le spectre associe des valeurs très élevées de α et de $f(\alpha)$ et est très étroit : la distribution spatiale de la population est uniforme (non fractale), presque toutes les cellules étant peuplées et comportant presque le même nombre d'habitants. Enfin, le spectre de la classe 5 est une

combinaison des classes 2 et 3. Il atteint des valeurs de $f(\alpha)$ moins élevées que le spectre de la classe 3 mais il est très large : les cellules ne sont pas toutes occupées aux différents niveaux d'analyse mais le MAUP de contenant est relativement faible ; en revanche, le MAUP de contenu est très fort.

La comparaison de la carte représentant les unités spatiales en fonction de leur classe de spectre multifractal (Figure 51) avec des cartes de densité de population et de dimensions fractales généralisées D_0 , D_1 et D_2 permet de décrire chacune des classes en termes de répartition spatiale de la population, voir (Sémécurbe, Tannier, Roux 2016). Dans la classe 1, la population est modérément concentrée localement. Dans la classe 2, la population est très concentrée localement. Dans la classe 3, la population est dispersée (les unités spatiales appartenant à cette classe sont localisées dans la périphérie des grandes villes ainsi que dans les zones rurales de l'ouest de la France). Dans la classe 4, la population est uniformément dense : il s'agit d'unités spatiales intra-urbaines. Enfin la classe 5 correspond à une configuration spatiale intermédiaire, combinant les caractéristiques des classes 2 et 3 : villages entourés de zones de faible densité de population dans lesquelles la population est uniformément dispersée.

Figure 51. Carte résultant de la classification des spectres multifractals de la distribution spatiale de population en France. 992 unités spatiales de 25 km de large.



Cette méthode d'analyse spatiale basée sur la classification de spectres multifractals pourrait être appliquée pour caractériser et comparer la concentration spatiale de différents types de population, par exemple les habitants ayant des revenus élevés ou des revenus faibles, ou bien les habitants de

plus de 65 ans ou de moins de 30 ans. Dans tous les cas, mener ce type d'analyse nécessite de considérer une zone d'étude assez large car les unités spatiales doivent être suffisamment grandes pour contenir différentes cellules de la δ -grille à la résolution spatiale la plus grossière. Par ailleurs, la taille de la cellule de la δ -grille à la résolution spatiale la plus fine doit être supérieure à la résolution spatiale des données analysées.

Y. Chen et J. Wang (2013) ont utilisé le spectre de singularité pour étudier l'évolution du tissu bâti de Pékin entre 1988 et 2009. Ils ont travaillé à partir d'images de télédétection à une résolution de 30 m. à six dates (1988, 1992, 1999, 2006 et 2009), en dénombrant la quantité de pixels bâtis présents dans chaque cellule de la δ -grille. L'intervalle de valeurs de δ n'est pas précisé par les auteurs. La série de valeurs de q calculées est $\{-1; -0.5; 0; 1; 2; 5; 10; 15; 20\}$, certaines valeurs étant bien inférieures et d'autres bien supérieures aux valeurs de q considérées pour l'analyse de la répartition de la population en France présentée précédemment. Sur cette base, Y. Chen et J. Wang mettent en évidence trois anormalités du spectre multifractal de Pékin : (1) les valeurs de D_q et de $\alpha(q)$ sont supérieures à 2 pour des q inférieurs à 0 ; (2) les valeurs de $\alpha(q)$ divergent tandis que celles de $f(\alpha)$ convergent immédiatement quand q devient inférieur à 0 ; (3) quand q tend vers $+\infty$, $f(\alpha)$ devrait s'approcher de 0 ou bien d'une valeur fixe, ce qui n'est pas le cas. De ces anormalités, Y. Chen et J. Wang en concluent que l'agglomération de Pékin perd petit à petit son caractère multifractal. Cette conclusion nous semble erronée car les anormalités des valeurs de D_q et de $f(\alpha)$ résultent en fait de problèmes d'estimation des paramètres multifractals et non de la perte de multifractalité du tissu bâti de Pékin⁵². D'une part, les fortes valeurs de $f(\alpha)$ en 2009 (proches de 2) s'expliquent aisément : on voit sur l'image de Pékin correspondante que presque tous les carreaux de la grille sont occupés. D'autre part, S. Appleby (1996) a fait remarquer que, quand q est négatif, l'estimation des paramètres multifractals est très instable car on se focalise sur les cellules comportant très peu de population (ou une très faible quantité du phénomène étudié) et les entropies généralisées sont alors très sensibles au positionnement de la δ -grille. Enfin, H. Wendt, P. Abry, S. Roux, S. Jaffard et B. Vedel (2009) ont montré qu'on peut étudier la multifractalité considérant des valeurs de q supérieures à 2 uniquement pour des constructions théoriques mathématiques et non pour des objets du monde réel.

2.2 L'existence d'invariances d'échelles dans la concentration locale des implantations humaines : une hypothèse simplificatrice ou une réalité mesurable ?

On observe une variation dans l'espace des mesures de dimension fractale : la dimension fractale estimée pour une ville entière et celle estimée pour chacun de ses quartiers sont différentes. Par exemple, pour une quarantaine de grandes villes européennes à partir d'images Corine Land Cover des surfaces bâties, M. Guérois (2003) a établi que deux domaines de fractalité séparent la zone de l'agglomération bâtie en continuité et les franges périurbaines. Elle a montré que les ordres de grandeur des dimensions fractales sont très différents : proches de 1,8 dans la zone agglomérée, nettement inférieurs à 1 dans le périurbain. Au sein d'une ville, chaque quartier a aussi sa propre dimension fractale. I. Thomas, P. Frankhauser et D. Badariotti (2012) ont montré, pour 97 quartiers

⁵² Cet avis sur l'article de Y. Chen et J. Wang (2013) et les arguments qui suivent sont émis par C. Tannier et F. Sémécurbe, conjointement.

de 18 agglomérations urbaines européennes, que leurs dimensions fractales peut être plus proche entre quartiers appartenant à des villes et des pays différents qu'entre quartiers appartenant à une même ville ou à un même pays. Selon ce point de vue, la morphologie des quartiers est indépendante de celle des villes dont ils font partie ou des pays auxquels ils appartiennent. Considérant des échelles encore plus fines, P. Frankhauser (2017) a montré que les dimensions fractales radiales locales calculées sur la commune de Cergy-Pontoise (Île-de-France) varient significativement d'un endroit à un autre de la commune.

Par ailleurs, pour un tissu bâti donné, qui peut être celui d'un quartier ou d'une ville entière, même si l'ajustement à une loi de puissance est statistiquement correct, le changement entre deux échelles $\alpha(\epsilon) = dN(\epsilon) / d\epsilon$ du nombre d'éléments dénombrés N pour chaque taille de voisinage ϵ varie notablement à travers les échelles tandis qu'il est constant pour une fractale auto-similaire. Ceci est mis en évidence au moyen de courbes du comportement scalant représentant $\alpha(\epsilon)$ pour différentes villes ou quartiers (Frankhauser 1997, 1998a, 2004 ; Tannier & Pumain 2005 ; Thomas, Frankhauser, Frenay, Verleysen 2010).

De fait, très tôt, des travaux pionniers en géographie ont insisté sur le fait que la dimension fractale n'est pas supposée être constante en réalité (Goodchild 1980) ; le plus souvent, elle est constante pour un certain intervalle d'échelles mais varie à travers des intervalles d'échelles successifs (Lam 1990 ; Lam & Quattrochi 1992 ; White & Engelen 1994 ; Tannier & Pumain 2005). L'étude du semis des bâtiments en France menée par F. Sémécurbe, C. Tannier et S. Roux (*soumis*) en donne une bonne illustration. La France métropolitaine a été couverte d'une grille de points d'estimation i (au nombre de 145 178) séparés les uns des autres de 2 000 m. Dans un rayon de 8 000 m. autour de chaque point i , la distribution spatiale des bâtiments a été étudiée. Les données utilisées à cet effet sont issues de la BD Topo ® IGN 2011 et représentent environ 24 millions de bâtiments. Afin de caractériser la distribution spatiale des bâtiments, F. Sémécurbe, C. Tannier et S. Roux ont proposé une nouvelle méthode intitulée GWFA (Geographically Weighted Fractal Analysis - équation 10) qui reprend la méthode *sandbox* (équation 8) en introduisant une pondération $W_{i,e}$ de la contribution des points e à $M_r(i)$ en fonction de leur distance au point d'estimation i pour une valeur de q égale à 0. L'introduction de la pondération $W_{i,e}$ s'inscrit dans la logique de la régression géographique pondérée (Brunsdon, Fotheringham, Charlton 1996 ; Fotheringham, Charlton, Brunsdon 1998).

$$M_r(i) = \left[\sum_e (W_{i,e} M_r(e))^{-1} \right]^{-1} \sim r^{D_0} \quad (10)$$

La valeur $M_r(i)$ de chaque point i a été calculée pour cinq rayons de distance r : 50, 100, 200, 400 et 800 m. Les estimations de dimensions fractales considérant l'intervalle de distance entre 0 et 800 m. ont montré une absence d'invariance d'échelles pour une grande partie des 145 178 unités spatiales étudiées. Au vu de ce constat, le choix a été fait de mener une analyse multi-échelle sans présupposé d'invariance d'échelles. Pour ce faire, la différence de logarithme de deux $M_r(i)$ entre deux intervalles d'échelles successifs a été calculée. Ceci donne par exemple, pour les rayons 50 m. et 100 m. :

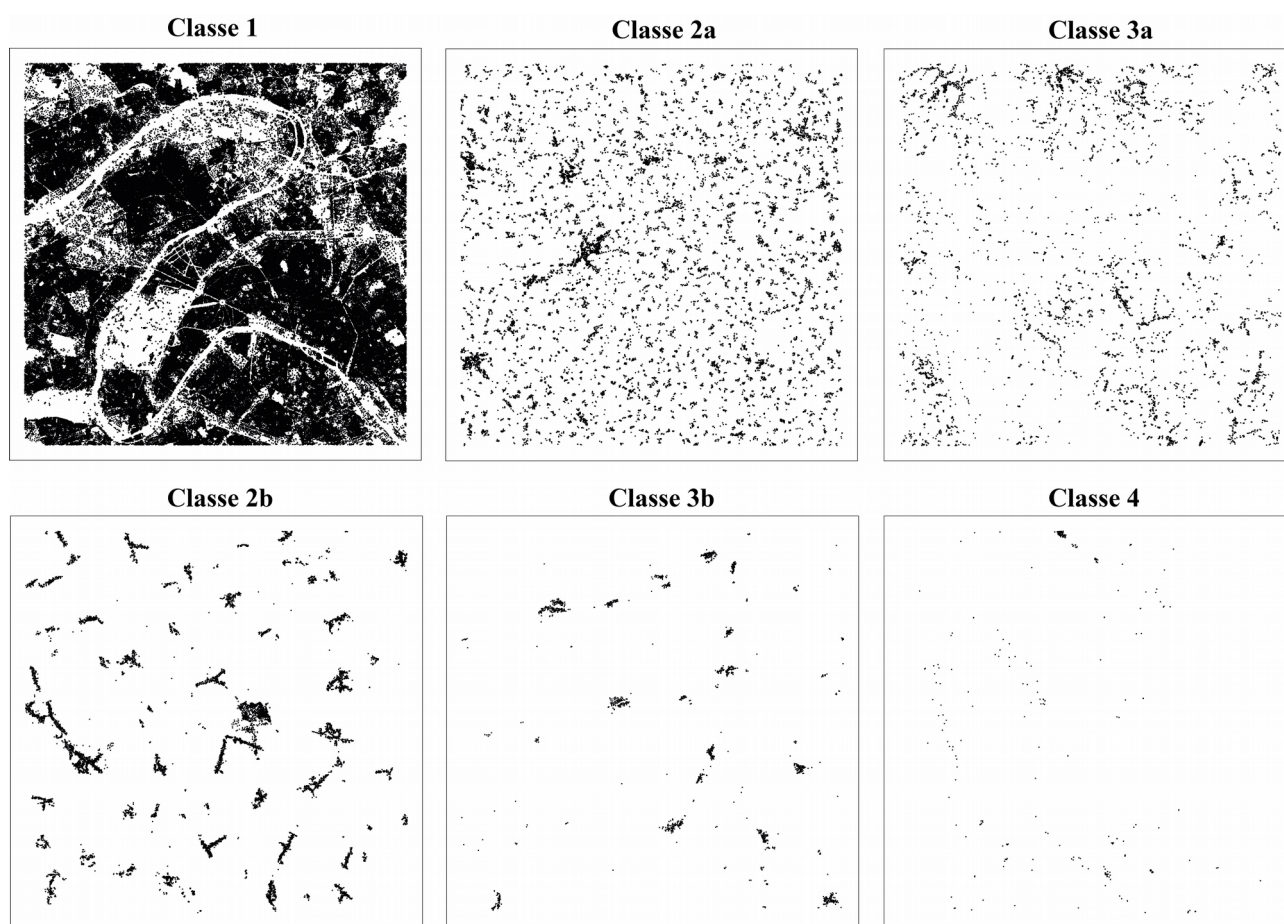
$$Sc_{100-50} = \log(M_{100}(i)) - \log(M_{50}(i)) \quad (11)$$

L'indice Sc correspond à l'indice $\alpha(\epsilon)$ précédemment cité. Avec cinq rayons de distance r , il est possible de calculer quatre indice Sc .

Une analyse en composantes principales (ACP) des 145 178 unités spatiales en fonction de leurs quatre indices Sc , suivie d'une classification des unités spatiales au regard de leurs coordonnées sur

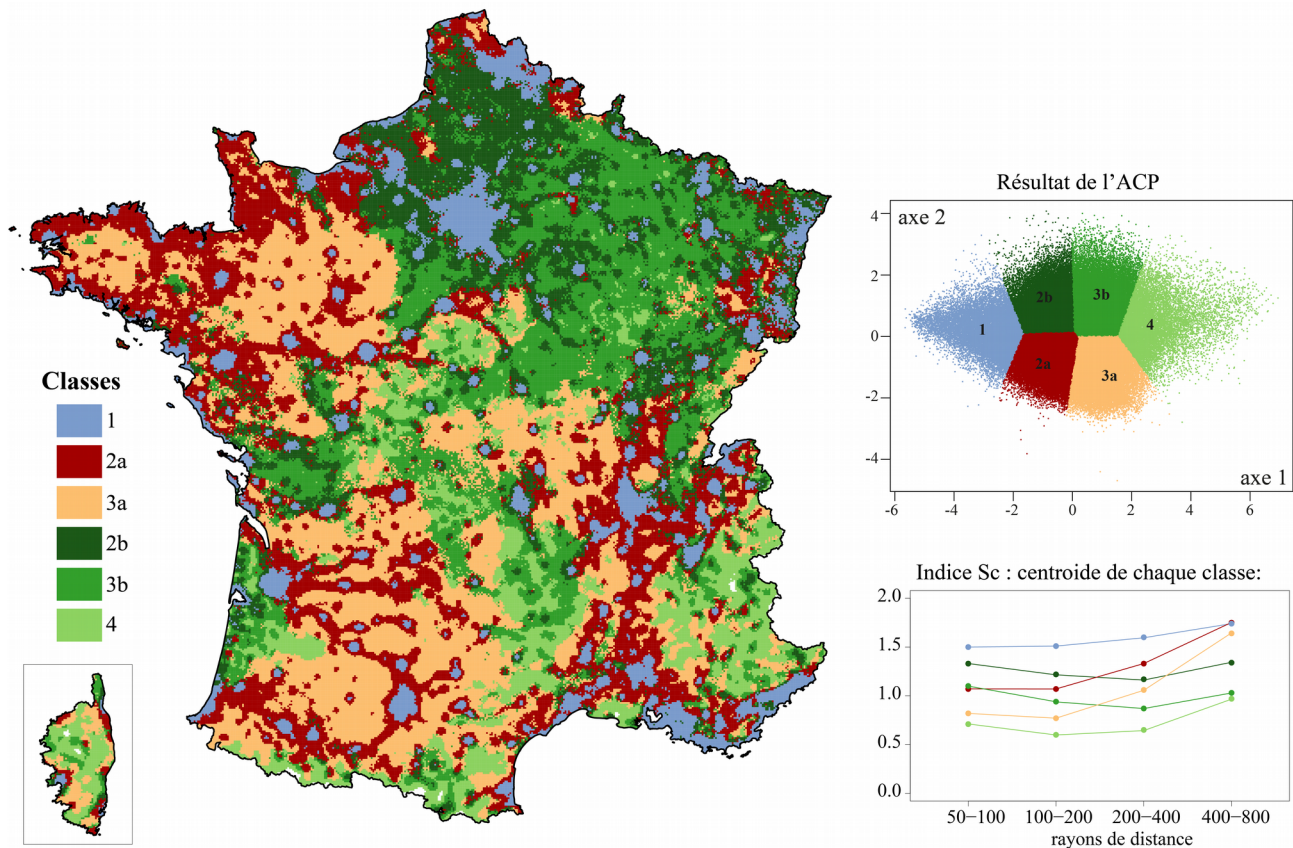
les deux premiers axes de l'ACP au moyen de la méthode des *k-means*, a permis d'identifier six types de tissus bâtis dont l'organisation spatiale, à plusieurs échelles, est bien différente (Figure 52) : la classe 1 rassemble les unités spatiales intra-urbaines ; la classe 4 rassemble les unités spatiale de bâti diffus ; les classes 2a et 3a rassemblent les tissus bâtis localement dispersés (ils sont davantage dispersés et diffus dans la classe 3a que dans la classe 2a) ; les classes 2b et 3b rassemblent les tissus bâtis localement concentrés (les villages dans la classe 2b sont plus gros et plus nombreux que dans la classe 3b).

Figure 52. Tissus bâtis caractéristiques de chaque classe. Source : F. Sémécurbe, C. Tannier, S. Roux (*soumis*).



La carte issue de cette typologie est spatialement bien structurée bien qu'aucun critère de contiguïté spatiale n'ait été introduit dans la classification (Figure 53).

Figure 53. Typologie de 145,178 tissus bâtis de France métropolitaine en fonction de leur comportement multi-échelles. Source : F. Sémécurbe, C. Tannier, S. Roux (*soumis*).



Finalement, les résultats de recherche présentés dans cette section 2.2 montrent que l'auto-similarité statistique des tissus bâtis est circonscrite spatialement et concerne une plage d'échelles restreinte. Pour autant, les mesures de dimensions fractales et les indices scalant associés permettent de différencier les tissus bâtis les uns des autres, les différences ou ressemblances identifiées ayant visuellement une cohérence.

« (...) *there are no true mathematical fractals in nature. Nevertheless, under specific conditions, physical objects (...) may have features that are very accurately described by fractals or prefactals* » (Baveye & Boast 1998).

La comparaison de tissus bâtis selon leurs dimensions fractales et indices scalants associés est pertinente sous réserve de choisir les indicateurs à même de capter les irrégularités spatiales visées et de mener les analyses selon un protocole rigoureux sur des données de même nature, à résolution spatiale suffisamment fine.

Il est possible de se baser sur le classement ordinal des dimensions fractale pour identifier différents types de tissus bâtis. Mais on ne sait pas encore quel crédit accorder à une petite différence de valeurs de dimensions (par exemple $D = 1,56$ et $D = 1,58$). On ne sait pas non plus bien interpréter thématiquement des différences de dimensions que l'on sait, par expérience, être significatives (par exemple, $D = 1,50$ et $D = 1,65$).

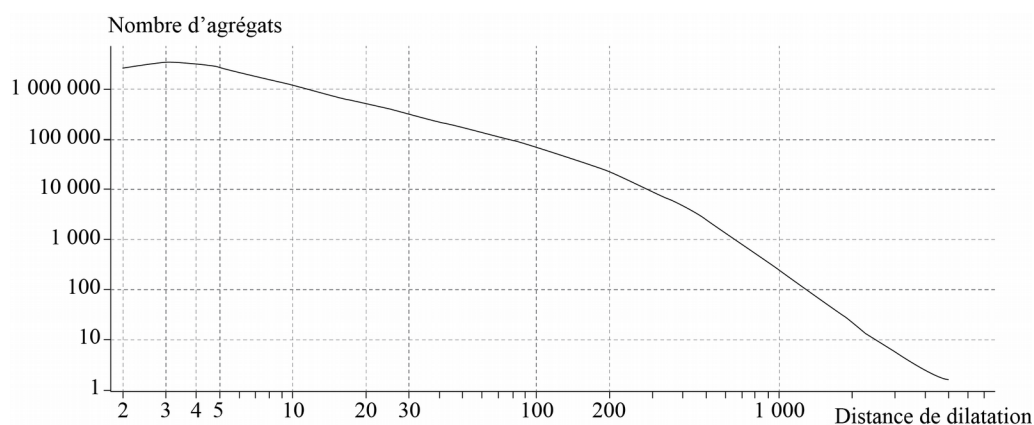
2.3 Caractérisation de la limite morphologique des agglomérations urbaines

Trois études sont présentées dans cette section du mémoire. La première concerne l'ensemble de la Belgique, la deuxième concerne les dix-huit plus grandes agglomérations urbaines belges et la troisième, vingt agglomérations urbaines françaises de taille moyenne. La délimitation d'agrégats bâtis suivant une approche fractale au moyen du logiciel MorphoLim (cf. section 1.2 de ce chapitre) constitue la base de toutes les analyses.

La Belgique, un continuum bâti ?

Nous avons travaillé à partir de données fournies par l'administration cadastrale belge (2011), qui représentent assez précisément l'emprise au sol des bâtiments⁵³. Ces données rassemblent 3,5 millions de polygones bâtis, la surface des plus petits polygones étant de 4 m². L'objectif de l'étude était de déterminer si le tissu bâti belge correspondait à un continuum dans lequel toutes agglomérations urbaines sont connectées les unes aux autres, leurs limites ne pouvant être clairement identifiées (Vandermotten, Roelandts, Halbert, Cornut 2008) ou bien s'il était composé d'agglomérations urbaines se différenciant assez clairement les unes des autres (Van Hecke, Halleux, Decroly, Mérenne-Schoumacker 2009).

Figure 54. Courbe résultant de la dilatation pas-à-pas du tissu bâti de la Belgique dans son ensemble.



La courbe de dilatation obtenue⁵⁴ est assez proche d'une droite (Figure 54) et la valeur de courbure principale (calculée pour un polynôme du cinquième degré) est égale à -0.11 , ce qui est faible. Cependant, un seuil de distance égal à 122,6 m. a pu être identifié avec MorphoLim. Ainsi, le continuum morphologique qui semble exister en observant visuellement une carte du tissu bâti de la Belgique n'est pas (ou pas encore) une réalité d'un point de vue fractal : des agglomérations urbaines et des villages peuvent encore être identifiés au niveau du pays dans son ensemble.

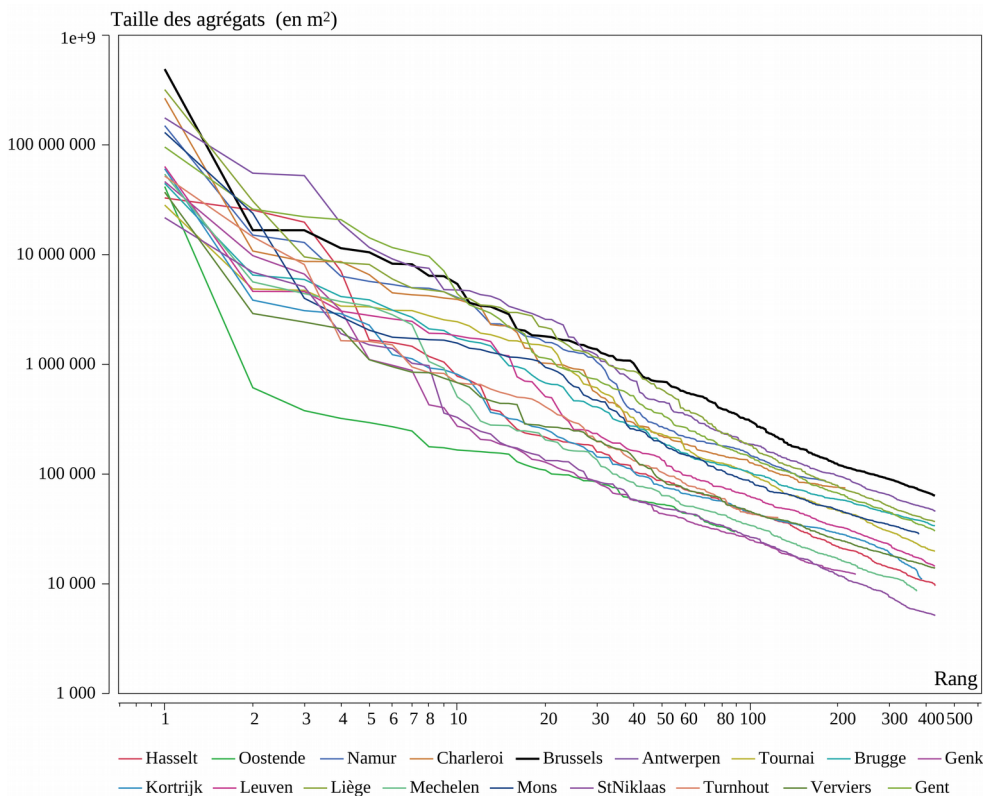
⁵³ Cette étude a été réalisée en 2011 par C. Tannier et I. Thomas, et n'a pas fait l'objet de publication en-dehors du présent mémoire.

⁵⁴ Le temps de calcul pour obtenir cette courbe avec MorphoLim a été de 13 h avec un ordinateur du mésocentre de calcul de l'Université de Franche-Comté, en utilisant 30 processeurs.

Y a-t-il un effet régional (différence entre Flandre et Wallonie) ou bien un effet de la taille de la ville sur la morphologie des dix-huit plus grandes agglomérations urbaines belges ?

A partir des mêmes données que celles utilisées pour l'étude du tissu bâti de la Belgique, nous avons analysé la forme globale des dix-huit plus grandes agglomérations urbaines belges (Tannier & Thomas 2013). Bien que pour certaines villes, notamment Bruxelles (*Brussels*), Genk, Hasselt et Sint-Niklaas, la courbe de dilatation soit proche d'une droite, il a été à chaque fois possible d'identifier un seuil de distance avec MorphoLim. Nous avons observé que des tissus bâtis caractérisés par des densités bâties comparables peuvent présenter des seuils de distance très différents, ce qui est cohérent avec le fait qu'une même densité puisse correspondre à des dimensions fractales très différentes (cf. Figure 44, section 1.2 de ce chapitre).

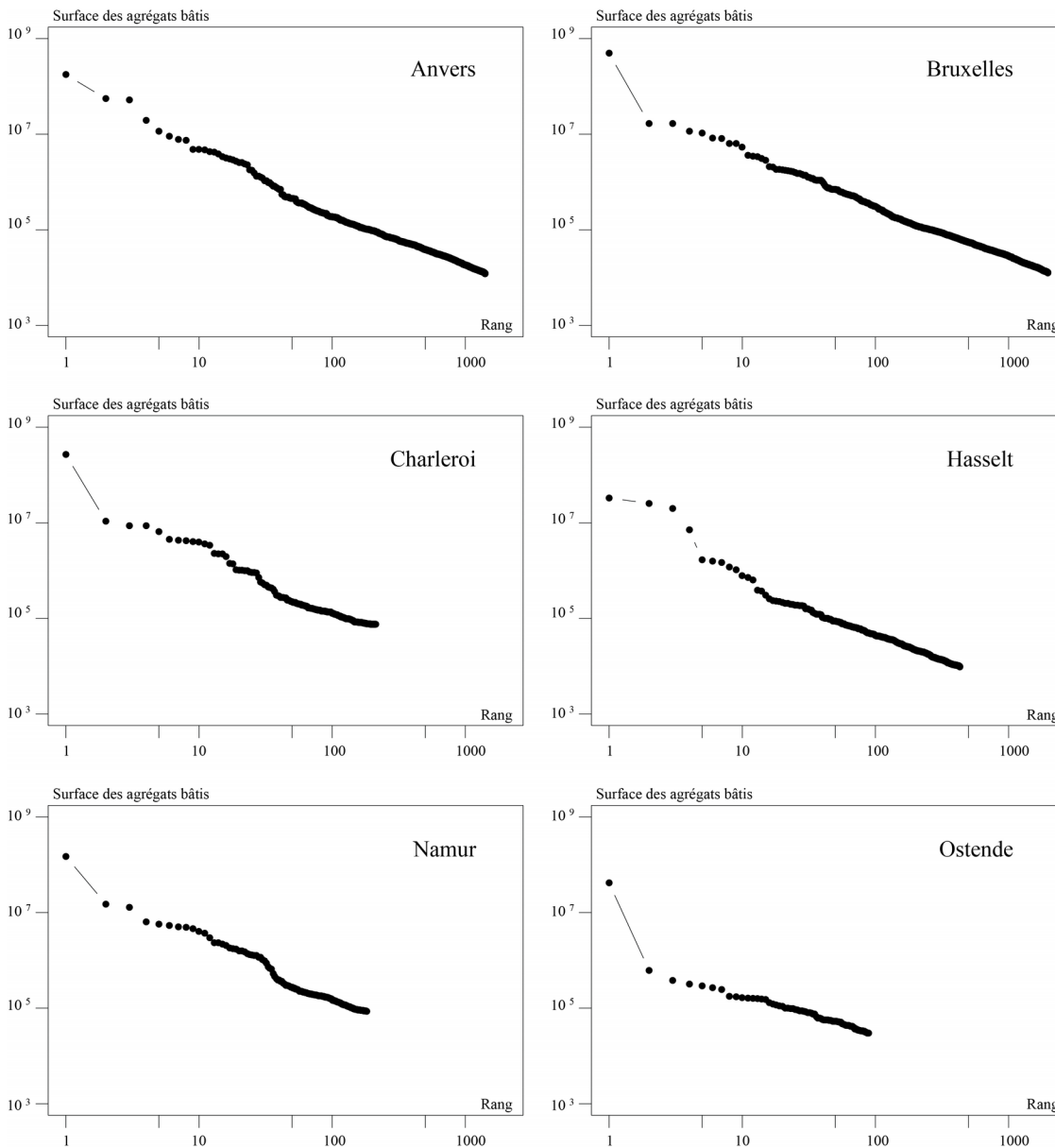
Figure 55. Distribution rang-taille des agrégats bâtis identifiés au moyen de MorphoLim pour les 18 plus grandes agglomérations urbaines belges.



Globalement, la forme des distributions rang-taille des agrégats bâtis, délimités en appliquant le seuil de distance identifié, pour chaque ville, avec MorphoLim, est assez semblable bien que la primatialité de l'agrégat principal soit, selon les cas, plus ou moins accentuée (Figure 55). Ces distributions montrent que l'agglomération morphologique est composée d'un unique agrégat bâti, sauf dans le cas d'Hasselt, dont l'agglomération comporte trois agrégats bâtis contigus (Figure 56)⁵⁵. D'un point de vue morphologique, les agglomérations urbaines belges sont donc monocentriques.

⁵⁵ Le cas d'Anvers (*Antwerpen*) pourrait être discuté.

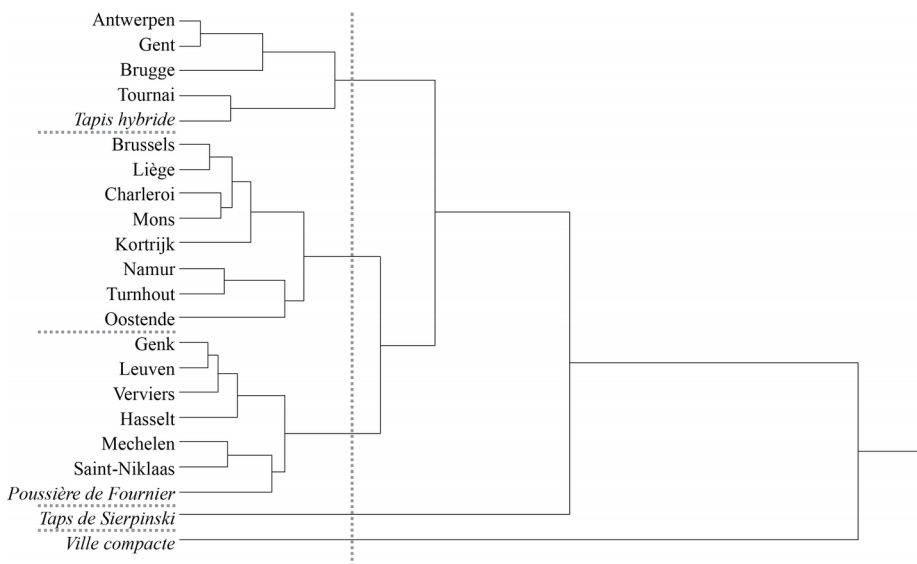
Figure 56. Distribution rang-taille des agrégats bâtis identifiés au moyen de MorphoLim pour six agglomérations urbaines belges bien différentes. Source : C. Tannier, I. Thomas (2013).



Ensuite, nous avons calculé six indicateurs permettant de caractériser la forme de l'agglomération morphologique des villes étudiées : la dimension fractale (*box-counting*) de la surface bâtie de l'agglomération morphologique et celle du contour de l'agglomération morphologique, la dendricité et la compacité de l'agglomération morphologique, la proportion de bâtiments de l'aire urbaine comprise dans l'agglomération morphologique et la proportion de bâtiments de l'agglomération morphologique localisés à moins de 5 m. de la bordure (contour) de celle-ci. Il ressort notamment que toutes les agglomérations belges ont un contour extrêmement dendritique, bien plus que le contour de villes théoriques fractales ou non fractales. La dendricité de ce contour n'est pas corrélée à la dimension fractale de la surface bâtie tandis qu'elle est négativement corrélée à la densité bâtie.

A partir des six indicateurs morphologiques sélectionnés, une classification ascendante hiérarchique de Ward des villes belges et de quatre villes théoriques a permis d'identifier six classes de villes (Figure 57). Deux classes contiennent uniquement une ville théorique : la ville compacte d'un côté et la ville "tapis de Sierpinski" de l'autre. Quatre villes belges (Anvers (*Antwerpen*), Gand (*Gent*), Bruges (*Brugge*), et Tournai) appartiennent à la même classe que la ville théorique "tapis fractal hybride". Toutes ces villes ont une distribution rang-taille des agrégats bâtis assez proche d'une droite et leur enveloppe morphologique est moins dendritique que celle des autres villes. D'autres villes belges, dont Hasselt, sont dans la même classe que la ville théorique "poussière de Fournier". Enfin les deux dernières classes regroupent uniquement des villes belges et aucune ville théorique.

Figure 57. Classification des 18 plus grandes agglomérations urbaines belges et de quatre villes théoriques en fonction de six caractéristiques morphologiques. Dendrogramme basé sur les distances standardisées. Source : C. Tannier, I. Thomas (2013).

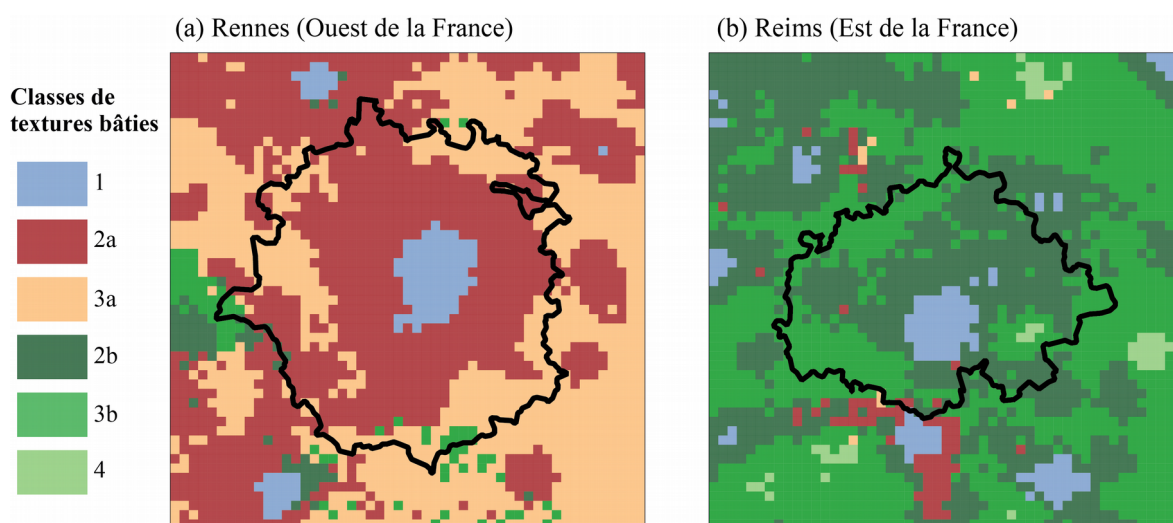


Ainsi, il est possible répondre à la question posée au départ : la classification ne révèle aucun effet de la région (Flandre ou Wallonie), ni de la taille des villes sur l'ensemble des caractéristiques morphologiques étudiées, bien que les villes flamandes aient souvent des densités bâties plus élevées et une enveloppe morphologique moins dendritique que les villes wallonnes.

Comparaison des textures bâties locales et de la forme de l'enveloppe morphologique de vingt agglomérations urbaines françaises

Pour vingt aires urbaines françaises de taille moyenne, nous avons comparé la forme globale des agglomérations morphologiques, caractérisée par le seuil de distance identifié au moyen de MorphoLim, et les textures bâties locales, définies via la classification des indices scalants résultant d'une analyse fractale géographiquement pondérée (GWFA) (cf. Figure 53, section 2.2 de ce chapitre). Chaque agglomération morphologique, délimitée en appliquant le seuil de distance issu de MorphoLim, contient plusieurs dizaines d'unités spatiales carrées de 2 km de côté (Figure 58).

Figure 58. Caractérisation des textures bâties de deux agglomérations urbaines françaises : Rennes et Reims. La ligne noire représente la délimitation de l'agglomération morphologique obtenue avec MorphoLim. Source : F. Sémécurbe, C. Tannier, S. Roux (*soumis*).



Sur le tableau 26, on constate que la proportion de tissus bâtis dispersés, respectivement concentrés, au sein de chaque agglomération morphologique est étroitement corrélée à la forme de leur enveloppe, c'est-à-dire leur seuil de distance identifié au moyen de MorphoLim. Plus les tissus bâtis sont dispersés en de nombreux petits villages et hameaux régulièrement espacés, plus le seuil de distance est faible. Inversement, plus le tissu bâti est localement concentré en de gros villages, plus le seuil de distance est élevé. La forme du contour des agglomérations urbaines françaises est donc déterminée par les formes bâties présentes dans leurs périphéries. Celles-ci sont elles-mêmes héritées des systèmes agraires traditionnels passés : bocage et openfield.

Tableau 26. Corrélation statistique entre le seuil de distance caractérisant chaque agglomération morphologique et les types de tissus bâtis qu'elles contiennent, pour 20 aires urbaines françaises de taille moyenne en 2011. p-values *** $p < 0.001$ ** $p < 0.01$ * $p < 0.05$. Source : F. Sémécurbe, C. Tannier, S. Roux (*soumis*).

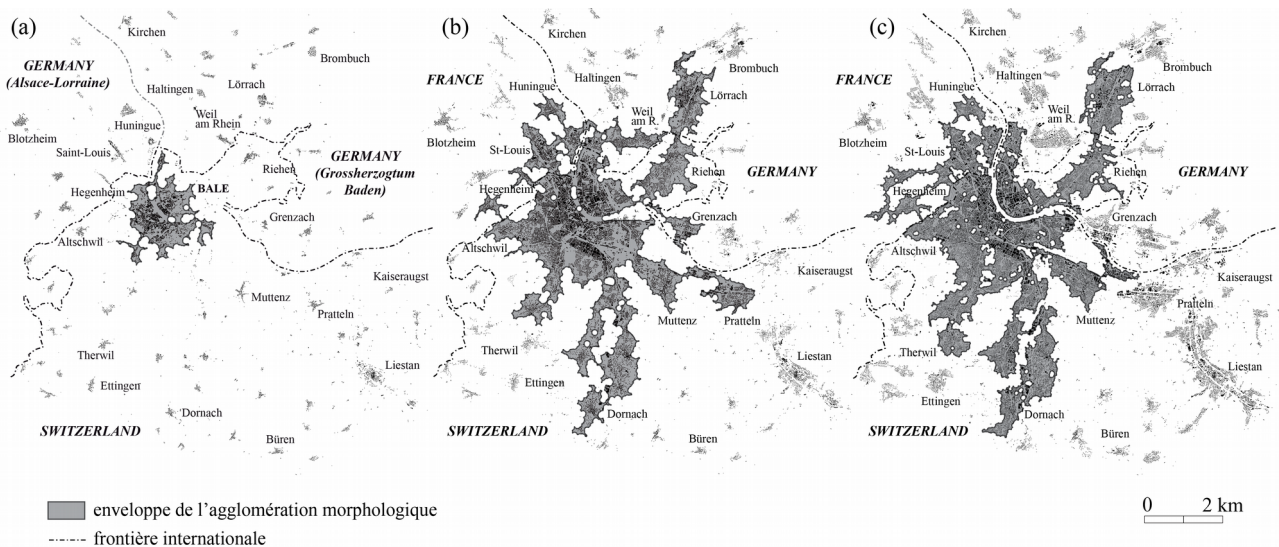
Variable	Coefficient de corrélation de Pearson
% d'unités spatiales appartenant aux classes 2a et 3a (tissu bâti localement dispersé)	-0.84***
% d'unités spatiales de la classe 2a	-0.84***
% d'unités spatiales de la classe 3a	-0.69***
% d'unités spatiales appartenant aux classes 2b et 3b (tissu bâti localement concentré)	0.89***
% d'unités spatiales de la classe 2b	0.81***
% d'unités spatiales de la classe 3b	0.62**
% d'unités spatiales appartenant à la classe 1 (tissu bâti du centre-ville)	-0.46*
% d'unités spatiales appartenant à la classe 4 (tissu bâti diffus)	0.10
Surface de l'agglomération morphologique	-0.03

2.4 Hypothèses quant à l'évolution de la fractalité des villes au cours du temps

Différents auteurs ont étudié l'évolution de la dimension fractale des villes au cours du temps. Bien qu'une comparaison des valeurs de dimensions entre une étude et une autre soit impossible en raison des différences de données et de méthodes de calcul, les tendances observées sont identiques. P. Frankhauser (1990, 1991, 1994) a calculé une augmentation de la dimension fractale de Berlin (Allemagne) au cours du temps : 1,43 en 1875, 1,54 en 1920 et 1,69 en 1945. G. Shen (2002) a calculé une augmentation de la dimension fractale de la ville de Baltimore (USA), de 1,015 en 1822 à 1,722 en 1992. Une augmentation de la dimension fractale de la surface bâtie a aussi été mise en évidence pour l'agglomération tri-nationale de Bâle (Suisse, France, Allemagne) entre 1882 et 1994 (Tannier & Pumain 2005) et pour l'agglomération de Lisbonne (Portugal) (Encarnaç o, Gaudiano, Santo, Tened rio, Pacheco 2012) entre 1960 et 2004.

D'autres auteurs ont mis en évidence le fait que la dendricité des agglomérations urbaines, c'est-à dire le rapport entre la dimension fractale de leur surface bâtie et celle de leur contour, diminue avec la croissance de celles-ci. En effet, pour l'agglomération de Tel Aviv (Isra el) entre 1935 et 2000, la relation surface-périmètre est demeur e la même pour tous agrégats bâtis, à l'exception de l'agrégat principal (Benguigui, Blumenfeld-Lieberthal, Czamanski 2006). Celui-ci était bien plus dendritique que les autres jusqu'en 1985 (indice de dendricité égal à 1), puis que cette dendricité a décru. On pourrait en déduire que la forme de l'agrégat bâti principal devient davantage compacte et moins irrégulière au cours du temps. Visuellement, on constate cependant l'inverse concernant l'évolution de l'agglomération morphologique de Bâle au cours du temps (Figure 59). Les agglomérations morphologiques belges en 2011, ayant une longue histoire derrière elles, présentent elles aussi une très forte dendricité (cf. section 2.3 de ce chapitre) et la dimension fractale de leur contour est d'autant plus élevée que l'agglomération est étendue (Tannier & Thomas 2013).

Figure 59. L'agglomération morphologique de B le en 1882, 1957 et 1994. Le seuil de distance identifié au moyen de MorphoLim est diff rent pour chacune des dates et diminue au cours du temps : 300 m. en 1882, 279 m. en 1957 et 173 m. en 1994. Source : C. Tannier, I. Thomas, G. Vuidel, P. Frankhauser (2011).



Si les villes évoluaient selon un processus de croissance fractale, leur dimension fractale ne devrait pas changer au cours du temps, ce que ne démontrent pas les études citées ci-avant. On peut

objecter le fait que celles-ci considèrent chaque ville au sein d'une emprise spatiale qui est fixe au cours du temps et qui inclut la ville proprement dite (qui s'étend progressivement) et sa périphérie (dont l'emprise spatiale diminue en parallèle de l'extension de la ville). D'autres études prennent en compte la ville selon une emprise spatiale qui croît au fur et à mesure du processus d'urbanisation. Notamment, L. Benguigui, D. Czamanski, M. Marinov et J. Portugali (2000) ont analysé l'évolution de l'agglomération de Tel Aviv de 1935 à 1991 en considérant trois zones d'étude emboîtées les unes dans les autres. Ils ont montré que les différentes parties de l'agglomération se développent différemment, certaines d'entre elles devenant fractales (*i. e.* statistiquement auto-similaires sur une certaine plage d'échelles) plus tôt que d'autres et que l'agglomération dans son ensemble ne devient fractale qu'à partir du milieu des années 1980. Leur étude montre aussi que, dans chaque partie de l'agglomération, la dimension fractale augmente à des vitesses différentes. Selon les auteurs, la poursuite de ces évolutions ferait que les différentes parties de l'agglomération atteindraient une seule et unique même dimension fractale en 2010. P. Frankhauser (1997) a abouti à des conclusions comparables à partir d'une démarche différente. Il a représenté l'évolution au cours du temps de la courbe du comportement scalant (cf. section 2.2 de ce chapitre) résultant d'une analyse fractale radiale à partir du centre de la ville, pour Lons-le-Saunier et Montbéliard (Est de la France), et Berlin. Les valeurs de $\alpha(\epsilon)$ des indices scalants sont initialement élevées à proximité du centre-ville et le demeurent. En périphérie, on observe des oscillations de $\alpha(\epsilon)$ autour de valeurs plus faibles. Au cours du temps, les oscillations s'atténuent (la courbe du comportement scalant devient plus lisse) et les valeurs de $\alpha(\epsilon)$ s'approchent graduellement de celles du centre. Le fait que la courbe du comportement scalant devient plus lisse signifie que le tissu bâti devient fractal (*i. e.* ici, statistiquement auto-similaire). D'après P. Frankhauser (1998b), ce serait le signe que celui-ci a atteint un stade de maturation : il ne serait dès lors plus rural, ni périurbain ; il serait désormais urbain.

Figure 60. Schéma d'évolution d'une ville européenne.

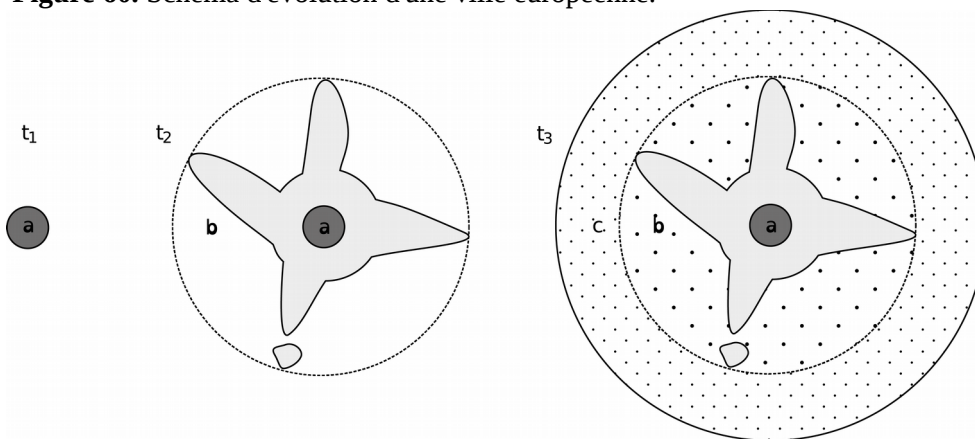


Tableau 27. Commentaire de la Figure 60. Densité et dimension fractale des trois zones (a, b, c) considérées indépendamment les unes des autres.

t	zone a	zone b	zone c
t ₁	forte densité bâtie et dimension fractale élevée		
t ₂		densité bâtie et dimension fractale moins fortes qu'en zone a	
t ₃		densité bâtie et dimension fractale moins fortes qu'en zone a, mais plus forte qu'en zone b en t ₂ (urbanisation plutôt diffuse entre les axes de transport principaux)	densité bâtie faible et dimension fractale assez élevée (tissu bâti plutôt uniforme)

Supposons qu'à chaque instant t , la ville soit de taille $r_{max}(t)$, avec $r_{max}(t) < r_{max}(t + 1)$. La dimension fractale de la surface bâtie de la ville est $D(r_{max})$ et la densité bâtie de la ville est $\eta(r_{max})$. Sur cette base, on peut représenter schématiquement différents stades d'évolution d'une ville européenne (Figure 60 et Tableau 27). Au départ, en t_1 , $D(r_{max})$ est proche de 2 quand la ville est circonscrite dans ses enceintes. Entre t_1 et t_2 , $D(r_{max})$ décroît avec l'urbanisation hors des enceintes primitives (urbanisation en doigts de gants de laquelle résulte une plus grande variété dans les distances inter-bâtiments). Puis en t_3 , $D(r_{max})$ croît en raison de l'uniformisation du tissu bâti due à l'étalement urbain (la motorisation des ménages, notamment, permet un développement résidentiel diffus à la fois entre les doigts de gants et au-delà du diamètre de la ville en t_2). En parallèle, la densité bâtie $\eta(r_{max})$ décroît entre t_1 , t_2 et t_3 .

S'intéressant à l'évolution de la distribution rang-taille des agrégats bâtis au cours du temps, L. Benguigui et D. Czamanski (2004) ont cherché à vérifier l'hypothèse que la fractalité des villes résulte notamment (mais pas uniquement) d'un processus dit de *leapfrogging*. Ce processus consiste en la création de nouveaux agrégats bâtis distants des agrégats existants, opérant à deux niveaux : celui de l'agglomération dans son ensemble et celui des parties (villes, centres de différents niveaux fonctionnels) la constituant. En simulant un processus de *leapfrogging*, L. Benguigui et D. Czamanski ont obtenu des configurations spatiales multifractales composées d'agrégats bâtis, dont les tailles différentes suivent une loi d'échelles. A partir de l'observation des distributions rang-taille des agrégats de Berlin (1800, 1875, 1910, 1920, 1945), Munich (1800, 1850, 1900, 1950, 1965), Daegu (Corée du Sud) (1988), Moscou (1980) et Philadelphie (1980), F. Schweitzer et J. Steinbrink (2002) ont émis l'hypothèse que la distribution rang-taille des agrégats bâtis des villes évoluait au cours du temps jusqu'à s'approcher d'une distribution de Pareto. Si tel était le cas, on pourrait en conclure que l'exposant de Pareto est indicateur du stade de développement d'un tissu urbain et que les déviations d'une distribution rang-taille des agrégats bâtis à une distribution parétienne indiquent des potentialités de développements futurs. Cependant, d'autres résultats de recherche empiriques contredisent cette hypothèse. Notamment, L. Benguigui, E. Blumenfeld-Lieberthal et D. Czamanski (2006) ont montré que la distribution rang-taille des agrégats bâtis de Tel Aviv a suivi une loi de Zipf entre 1935 et 1964 puis s'en est progressivement écarté entre 1974 et 2000.

Pour P. Frankhauser (2004), ainsi que N. Salingaros et B. West (1999), la combinaison de deux types de processus serait à l'origine de l'émergence de tissus urbains fractals : des processus *bottom-up*, consistant en l'action des individus (par exemple, le choix d'acquérir un pavillon neuf en zone périurbaine) et des groupes de pression (par exemple, les actions s'inscrivant dans la logique Nimby (*Not In My BackYard*)), et des processus *top-down* (par exemple, les actions de planification urbaine). Pour F. Schweitzer et J. Steinbrink (2002), l'interaction entre des actions contradictoires de niveau uniquement individuel, en l'occurrence la recherche d'une localisation résidentielle minimisant la distance à la fois au centre-ville et à la bordure urbanisée (campagne), peut aussi être à l'origine de tissus urbains fractals. L'idée d'auto-organisation est sous-jacente à ces différentes hypothèses. Dans un système auto-organisé, une structure d'ordre méso- ou macroscopique émerge des interactions de niveau microscopique et contraint, en retour, les évolutions futures du système. Certains auteurs ajoutent à l'idée d'auto-organisation celle de facteur limitant, qui correspond souvent à une taille maximale de ville impossible à dépasser (Schweitzer & Steinbrink 2002) ou bien à un taux d'urbanisation maximum (Chen 2016).

Cependant, une ville ne se construit pas au fil des siècles selon un procédé de croissance monofractal ou multifractal qui serait unique et se poursuivrait jusqu'à un stade de "maturité" finale de la forme urbaine. En effet, les règles présidant à la localisation et à la forme des nouveaux

développements urbains changent au cours du temps. Notamment, A. Bretagnolle, F. Paulus et D. Pumain (2002) et A. Bretagnolle (2005) ont montré l'effet de l'augmentation de la vitesse des transports et de la circulation de l'information sur l'évolution de la forme des agglomérations urbaines. C'est pourquoi, C. Schmitt, S. Rey-Coyrehourcq, R. Reuillon et D. Pumain (2015) ont introduit l'effet de vagues d'innovation successives dans leur modèle SimpopLocal de croissance des villes sur plusieurs siècles. Par ailleurs, dans les villes européennes, le processus d'étalement urbain consiste en l'intégration progressive dans la ville de zones bâties périphériques pré-existantes (villages, hameaux ou semis diffus relativement dense de bâtiments ruraux). Le tissu urbain d'une ville peut aussi être, à certains moments, profondément modifié par destruction et reconstruction (par exemple, l'Hausmanisation de Paris au 19^{ème} siècle, les villes reconstruites après avoir été partiellement détruites par des bombardements ou des catastrophes naturelles, ou encore la destruction massive de bâti ancien et la reconstruction de larges immeubles ou de gratte-ciels dans les grandes villes chinoises contemporaines). Il existe aussi des cas de croissance urbaine ex nihilo (par exemple, les villes nouvelles de banlieue parisienne ou la ville de Brasilia au Brésil).

3. Modèles fractals d'urbanisation : l'auto-similarité au service de l'aménagement urbain

« L'auto-similarité (le caractère auto-scalant) de l'espace géographique a été interprété, par exemple par Philbrick (1957), comme résultant d'une alternance quasi-systématique des effets de polarisation, qui différencient un centre et sa périphérie, et des effets de similitude, qui définissent des régions homogènes, et cela à toutes les échelles géographiques : des parcelles d'une exploitation, homogènes, sont polarisées par une ferme, la réunion de plusieurs exploitations forme une petite région agricole homogène polarisée par un bourg-marché, plusieurs régions agricoles forment elles-mêmes la périphérie d'une petite capitale régionale, laquelle entre à son tour avec d'autres de ses semblables dans une région polarisée par une métropole, etc. » (François, Frankhauser, Pumain 1995).

Dans cette section du mémoire, l'auto-similarité est posée comme un principe d'aménagement que les nouveaux développements urbains doivent respecter. Deux modèles de simulation ont été conçus à cet effet : MUP-City, qui permet de simuler un développement résidentiel fractal sous contraintes d'accessibilité, et Fractalopolis, qui est dédié à la conception interactive de plans de développement urbain multifractals. Ces deux modèles intègrent une dépendance d'échelles relative à la forme des développements urbains : un espace non bâti à un niveau macro- ou mésoscopique ne peut pas être bâti à un niveau microscopique. Ainsi, MUP-City et Fractalopolis préservent, à une résolution spatiale fine, les espaces non bâtis identifiés à une résolution spatiale plus grossière. Ce faisant, ils respectent le principe selon lequel la fractalité des tissus urbains trouve essentiellement son origine dans l'organisation spatiale des espaces non bâtis et non dans celle des espaces bâtis. Le modèle Fractalopolis intègre en outre un principe de dépendance d'échelles fonctionnelle : le niveau fonctionnel de chaque centre de développement urbain, fixé par le modèle, détermine les aires de chalandise desdits centres ainsi que le nombre et la diversité des commerces, services et infrastructures vertes et de loisir attendus dans chacun d'eux.

Les nouveaux développements résidentiels simulés avec MUP-City et les plans de développement urbain conçus avec Fractalopolis sont issus de l'application de règles géométriques récursives

desquelles résultent le fait que les configurations spatiales ainsi créées sont statistiquement auto-similaires. Dans la suite du mémoire, ces configurations sont simplement qualifiées de fractales.

3.1 Éléments de réflexion concernant les implications fonctionnelles de formes urbaines fractales

En préalable de la présentation des modèles MUP-City et Fractalopolis, nous avons choisi de faire une courte synthèse des recherches visant à déterminer les implications fonctionnelles de la fractalité (existante ou à créer) des tissus bâtis intra-urbains et périurbains.

Forme du contour des agglomérations urbaines

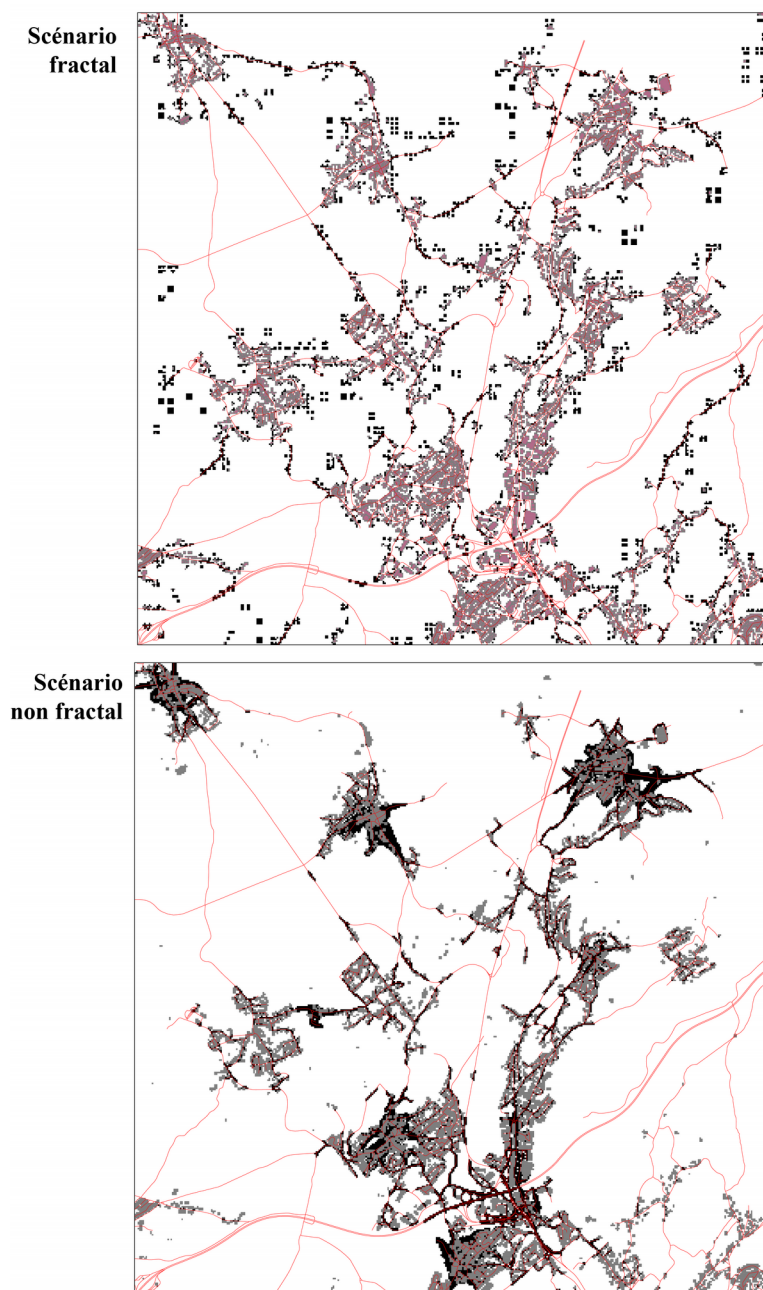
Différents chercheurs ont remarqué que la relation entre le périmètre des villes et leur surface ressemble à celle de certains objets fractals (Longley & Batty 1989 ; Frankhauser 1994) : leur périmètre s'allonge énormément quand on affine la résolution spatiale à laquelle on les observe ; leur surface, elle, augmente relativement peu et tend vers une limite identifiable. Au vu de ce constat, l'idée est venue à certains chercheurs d'allonger le contour des agrégats bâtis, ce qui n'augmente pas de beaucoup leur surface, afin de maximiser le contact direct entre l'intérieur et l'extérieur (Arlinghaus & Nystuen 1990). Suivant dans cette logique, P. Frankhauser (2000) a comparé les distances au centre et à la bordure urbanisée (*i. e.* la limite entre la ville et la campagne) de deux formes de villes théoriques de même surface mais ayant un contour lisse dans un cas (ville carrée) et dendritique dans un autre (ville ayant la forme d'une figure fractale nommée téragone). Avec cette deuxième forme de ville, la distance moyenne à la bordure urbanisée, depuis n'importe quel lieu de la ville, est bien inférieure à celle de la ville carrée tandis que la distance moyenne au centre est presque équivalente. L'étude de six autres villes théoriques cartographiées à l'échelle du bâtiment, certaines fractales et d'autres non fractales, a confirmé le fait qu'une bordure très dendritique permet d'augmenter de façon importante le nombre de bâtiments localisés à moins de 5 m. de celle-ci (Tannier & Thomas 2013).

Proximité des lieux de résidence aux commerces, services et espaces verts et naturels

Sur cet aspect, une série d'études a visé à comparer l'intérêt respectif de développements résidentiels fractals et non fractals, en zone périurbaine, en termes de distance des résidents aux commerces et services ainsi qu'aux espaces verts et naturels de fréquentation quotidienne et hebdomadaire. L'objectif sous-jacent était d'identifier des formes périurbaines dans lesquels les déplacements quotidiens et hebdomadaires pouvaient être effectués à pied ou en vélo. Dans chacune de ces études, l'espace est représenté sous la forme de cartes raster dans lesquelles les cellules ont toutes 20 m. de côté. De manière simplificatrice, on imagine que chaque cellule bâtie correspond à un bâtiment résidentiel et que chaque cellule non bâtie est occupée par des espaces verts ou naturels. Les commerces et services sont représentés par des points.

Dans un premier temps, des scénarios théoriques de développement résidentiel fractal et non fractal ont été évalués. Ces scénarios n'intègrent pas de contraintes en termes de nombre de cellules à urbaniser. Celui-ci varie de ce fait énormément en fonction de la dimension fractale des développements résidentiels simulés. Une première étude a consisté en la comparaison de 16 scénarios théoriques, 8 fractals (de dimension fractale égale à 1,26, 1,46, 1,63 ou 1,77) et 8 non fractals (Figure 61).

Figure 61. Deux exemples de scénarios théoriques. Secteur Nord de l'agglomération de Besançon. 14 928 cellules initialement urbanisées (en gris) ; 7 765 cellules nouvellement urbanisées (en noir). Adapté de : C. Tannier, G. Vuidel, P. Frankhauser, H. Houot (2010).



Trois critères d'évaluation ont été considérés : le nombre de contacts entre cellules bâties et non bâties, la distance moyenne (à vol d'oiseau) au commerce ou service le plus proche de fréquentation quotidienne et la distance moyenne au commerce ou service le plus proche de fréquentation hebdomadaire (Tannier, Vuidel, Frankhauser, Houot 2010). Les résultats obtenus ont montré que le gain relatif d'accessibilité aux espaces non bâtis des scénarios fractals est plus élevé que la perte relative d'accessibilité aux commerces et services, au regard des scénarios non fractals. Une deuxième étude a consisté en la comparaison de 50 scénarios théoriques de développement résidentiel, 25 scénarios fractals (5 valeurs de dimension fractale) et 25 scénarios non fractals. La localisation des commerces et services variait selon les scénarios (Tannier, Vuidel, Houot,

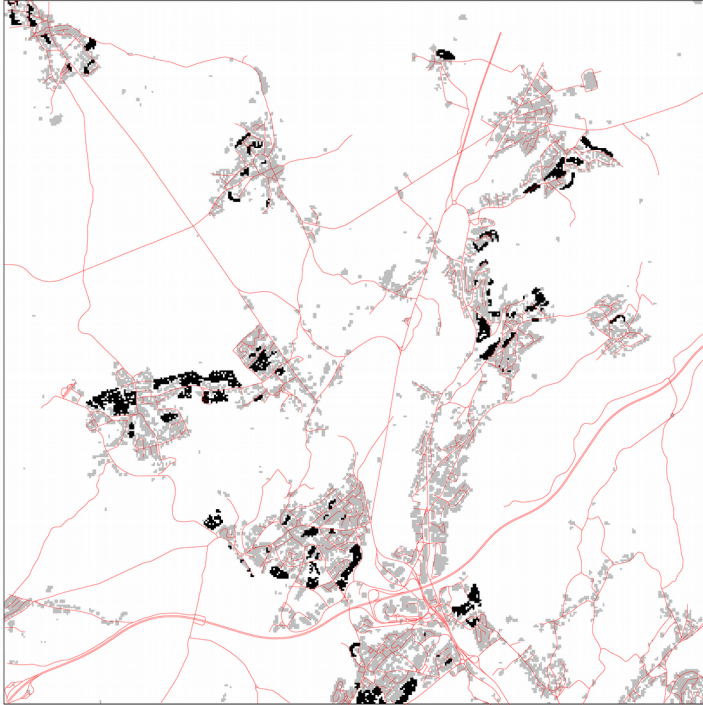
Frankhauser 2012). Huit critères d'évaluation ont été considérés : la distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquentation quotidienne le plus proche, la distance moyenne de chaque cellule bâtie au commerce et service de fréquentation hebdomadaire le plus proche, le nombre moyen de commerces et services de fréquentation quotidienne distants de moins de 400 m. de chaque cellule bâtie (accès à pied), le nombre moyen de commerces et services de fréquentation hebdomadaire distants de moins de 2 000 m. de chaque cellule bâtie (accès en vélo), la part de cellules bâties contiguës à au moins une cellule non bâtie, le nombre moyen de cellules non bâties contiguës à chaque cellule bâtie, la distance moyenne de chaque cellule bâtie à la bordure urbanisée, la part de cellules bâties situées à moins de 5 m. de la bordure urbanisée. Les distances ont été calculées sur le réseau des routes et chemins.

Les résultats obtenus montrent que les scénarios fractals nécessitent de parcourir moins de distance pour accéder à différents types d'espaces ouverts que les scénarios non fractals, mais davantage de distance pour fréquenter différents types de commerces et services. On peut améliorer l'accessibilité aux commerces et services des scénarios fractals en modifiant la localisation des commerces et services mais on ne peut pas améliorer l'accessibilité aux espaces ouverts des scénarios non fractals. Par conséquent, un développement résidentiel fractal combiné à une politique volontariste d'aménagement commercial pourrait permettre un bon accès de la population à la fois aux espaces ouverts de récréation et de loisir et aux commerces et services.

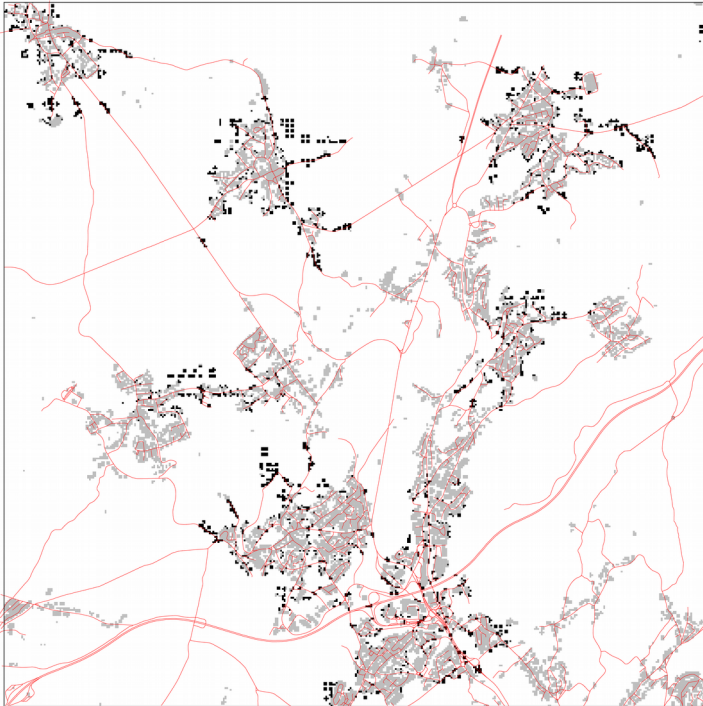
Deux autres études ont permis la comparaison de scénarios réalistes de développement résidentiel (Figure 62). Le réalisme de ces scénarios résulte de l'introduction de contraintes d'aménagement supplémentaires. Notamment, le nombre de cellules à urbaniser a été fixé à 2 400. Pour ce faire, seules les cellules suffisamment proches des commerces et services ont été urbanisées. Les seuils de distance aux commerces et services étaient différents selon les scénarios. La première étude a consisté en la comparaison de 5 scénarios (Frankhauser, Tannier, Vuidel, Houot 2010). Deux scénarios représentent des formes de développement résidentiel fractales. Deux autres scénarios représentent des formes de développement résidentiel non fractales et très compactes. Le cinquième scénario correspond à une spatialisation d'un projet d'urbanisation de l'Agence d'urbanisme de l'agglomération de Besançon (AUDAB). Ce scénario n'est pas fractal mais le développement résidentiel simulé préserve des espaces libres au sein des tissus bâtis. Les résultats obtenus montrent que quel que soit le scénario considéré, la distance moyenne au commerce et service le plus proche, calculée sur le réseau, diminue. Les deux scénarios non fractals améliorent davantage que les autres l'accessibilité moyenne aux commerces et services. En revanche, ils détériorent l'accessibilité moyenne des résidents aux espaces non bâtis (de nombreuses cellules bâties se retrouvent privées d'un contact direct avec une cellule non bâtie) tandis que les deux scénarios fractals et la spatialisation du projet de l'AUDAB permettent de l'améliorer. En conclusion, les scénarios fractals ayant des formes très dendritiques (ce qui est *a priori* négatif au regard des praticiens de l'aménagement) permettent néanmoins de préserver une distance acceptable non seulement aux espaces ouverts mais aussi aux commerces et services. Une dernière étude, davantage précise en matière de mesure de l'accessibilité aux commerces et services, a permis de confirmer ces résultats (Houot, Tannier, Vuidel, Frankhauser 2009). 25 scénarios fractals de développement résidentiel ont été comparés. Ces scénarios incluent cinq variantes en matière d'aménagement commercial (nombre et localisation des commerces et services). Les critères d'évaluation considérés ont été la distance moyenne (sur le réseau des routes et chemins) des cellules bâties aux m -commerces et services les plus proches ($m = 1, 2, 3$ et n) ainsi que le nombre moyen de commerces et services situés à une distance inférieure à 400, 1000 et 2000 m. de chaque cellule bâtie.

Figure 62. Deux exemples de scénarios réalistes fractals et non fractals. Secteur Nord de l'agglomération de Besançon. 14 928 cellules initialement urbanisées (en gris) ; 2 353 cellules nouvellement urbanisées (en noir). Adapté de : P. Frankhauser, C. Tannier, G. Vuidel, H. Houot (2010).

(a) Spatialisation d'un projet de l'Agence d'urbanisme de Besançon
(V. Paillot 2009, ThéMA)



(b) Scénario fractal (dimension fractale des nouvelles extensions bâties $D = 1,26$)



Les résultats obtenus montrent que l'accessibilité aux commerces et services des différents scénarios est toujours meilleure que l'accessibilité calculée pour la situation initiale. Une urbanisation fractale ne détériore donc pas forcément l'accessibilité aux commerces et services, mais au contraire, peut l'améliorer. La dimension fractale des développements résidentiels simulés influe davantage sur l'accessibilité des résidents aux commerces et services que la configuration spatiale de l'offre commerciale.

Réponse aux attentes de la population

Dans différentes publications, l'idée est émise qu'une forme urbaine fractale répond mieux aux attentes de la population. La qualité esthétique et paysagère de formes urbaines fractales est mise en avant dans deux articles (Cooper & Oskrochi 2008 ; Stamps 2002). Un autre article défend l'idée qu'un développement résidentiel fractal est bénéfique pour la construction de logements à coût abordable (Niang & Soboyejo 2006). Une quatrième étude met en évidence, pour les communes wallonnes de Belgique, une relation statistique positive entre la satisfaction résidentielle des habitants et la dimension fractale du tissu bâti de la commune (Thomas, Tannier, Frankhauser 2008). Dans d'autres articles, les auteurs montrent qu'une ville de la forme d'un tapis de Sierpinski est plus intéressante qu'une ville compacte de forme carrée pour des individus qui fréquentent souvent des centres secondaires de taille moyenne, des petits centres de proximité et des espaces ouverts, mais qui se rendent moins souvent dans le centre principal (Frankhauser & Genre-Grandpierre 1998 ; Cavailhès, Frankhauser, Peeters, Thomas 2004).

Certaines études des choix résidentiels des ménages montrent que ni les aménités vertes, ni la qualité paysagère n'ont de réelle influence sur les choix résidentiels (Vogt & Marans 2004). En effet, dans le cadre d'une recherche menée avec la plateforme de simulation MobiSim, les ménages solvables avec enfants quittent Besançon alors même que leur satisfaction vis-à-vis de leur environnement résidentiel est meilleure qu'en périphérie (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016). Cependant, ceci s'explique par une offre de logements inadaptée dans la commune de Besançon (faible nombre de logements de grande taille, quasi-absence de maisons individuelles à louer et coût des logements élevés), et non par l'absence d'intérêt pour un environnement résidentiel esthétique et paysager de qualité. En s'appuyant sur des recherches telles que celles de J. Geoghegan (2002), on peut poser l'hypothèse que la ville fractale ne correspond pas à un modèle de choix résidentiel à un instant donné, mais à un modèle de satisfaction résidentielle au cours du temps : dans une ville fractale, la qualité de l'environnement résidentiel serait préservée, voire améliorée, et par conséquent la satisfaction des individus le serait aussi.

Préservation de la biodiversité

D'un point de vue écologique, les milieux urbains sont souvent très dynamiques (Angold, Sadler *et al.* 2006 ; Savard, Clergeau, Mennechez 2000). Par exemple, les zones urbaines peuvent abriter une variété remarquable d'insectes pollinisateurs (Baldock, Goddard *et al.* 2015). Cependant, on constate aussi que l'urbanisation induit une perte notable de biodiversité résultant à la fois de la réduction et de la fragmentation des habitats des espèces animales et végétales (Fahrig 1997 ; Hanski 2011) et de l'effet de barrière des zones urbanisées (Marull & Mallarach 2005) et des infrastructures de transport (Forman & Alexander, 1998 ; Gurrutxaga, Lozano, Del Barrio 2010 ; Girardet, Foltête, Clauzel 2013). Ces impacts varient en fonction de la forme et de l'intensité de l'urbanisation (Alberti 2005). Considérant une région urbaine dans son ensemble, l'étalement urbain augmente le trafic sur les axes routiers et ferroviaires et, par conséquent, l'effet barrière des réseaux de transport. A une échelle davantage locale, un développement urbain dense peut éviter la perte

d'habitat écologique (Conway 2009) mais, concomitamment, augmente l'effet de barrière des zones urbanisées (Aguilera, Valenzuela, Botequilha-Leitão 2011). Inversement, avec un développement urbain diffus, l'effet de barrière des zones urbanisées est réduit mais la fragmentation des habitats écologiques est augmentée (Czamanski, Benenson, Malkinson, Marinov, Roth, Wittenberg 2008).

Au vu de ces constats, on peut poser trois questions très générales : à l'échelle d'une région urbaine, est-ce davantage souhaitable de concentrer les développements urbains dans l'agglomération principale ou bien de distribuer la croissance dans plusieurs centres (développement urbain polycentrique) ? Est-ce que la bordure urbanisée doit être lisse et franche ou bien dendritique et plus floue ? A l'échelle des quartiers ou des îlots, le développement urbain doit-il être très dense ou moyennement dense ? Ces questions se posent à peu près dans les mêmes termes quand on considère la qualité de vie des êtres humains et les impacts environnementaux dus à leurs déplacements (notamment, la pollution atmosphérique et sonore) et à leur logement (notamment, la consommation énergétique des ménages pour le chauffage et la climatisation). Il est extrêmement difficile d'y répondre en raison des très nombreuses variables en interaction qu'il faudrait prendre en compte. Mais quand on considère la biodiversité dans son ensemble, le niveau de complexité des questions posées croît énormément en raison de l'existence de milliers d'espèces animales et végétales différentes en interaction, chacune ayant des besoins plus ou moins spécifiques, certaines s'adaptant mieux que d'autres aux milieux urbains et/ou supportant mieux que d'autres l'anthropisation de leurs lieux de vie.

On comprend dès lors que l'intérêt de formes de développement résidentiel fractales pour la préservation de la biodiversité soit un domaine de recherche qui demeure très peu exploré jusqu'à présent. Une étude basée sur la simulation de scénarios théoriques de développements résidentiels fractals et non fractals a montré que la réduction de la connectivité des habitats écologiques est quasi-identique pour les deux types de scénarios quand le processus d'urbanisation est peu intense. Quand l'intensité de celui-ci augmente, les scénarios non fractals sont plus avantageux que les scénarios non fractals, excepté pour les espèces animales ayant de courtes distances de dispersion (Tannier, Foltête, Girardet 2012). Une autre étude, basée sur des scénarios réalistes de développement résidentiel de forme fractale au niveau local, a considéré l'impact de ces développements sur trois espèces animales forestières (le lynx, le chat sauvage et l'écureuil roux) ayant une distance de dispersion respectivement longue, moyenne et courte (Tannier, Bourgeois, Houot, Foltête 2016). Les résultats obtenus montrent qu'un développement résidentiel concentré dans l'agrégat bâti principal permet de préserver davantage la connectivité écologique fonctionnelle des habitats des trois espèces qu'un développement résidentiel réparti dans tous les agrégats bâtis (excepté les plus petits). Pour tous les scénarios sauf un, le déclin en termes de connectivité est dû essentiellement à l'effet barrière des réseaux de transport (augmentation de trafic), sachant qu'aucune construction de nouvelle infrastructure n'a été simulée, plus qu'à l'effet de barrière des zones urbanisées. Selon les scénarios, la connectivité des habitats des trois espèces animales est plus ou moins impactée sans que l'on puisse établir de lien systématique entre les paramètres de forme du développement résidentiel simulé et les impacts mesurés.

Normes fractales d'aménagement

La question qui nous intéresse ici est de savoir si, sur la base de l'ensemble des résultats de recherche exposés précédemment, il est ou non possible de fixer des normes fractales d'aménagement.

Concernant la préservation de la biodiversité, maintenir ou créer des réseaux interconnectés d'espaces verts et naturels ayant des tailles variées est un principe d'aménagement souvent

préconisé. En effet, des taches d'habitats écologiques de petite taille et/ou séparées les unes des autres par de longues distances constituent en général de mauvaises conditions pour la préservation de la biodiversité⁵⁶ (Collinge 1996 ; Forman 1995). Dans cette optique, il semble intéressant de promouvoir des formes fractales de développement urbain qui permettent d'éviter la fragmentation des espaces non bâtis. En particulier, dans certaines configurations bâties multifractales, les espaces non bâtis peuvent avoir des tailles très diversifiées, leur distribution rang-taille suivant une loi d'échelles (Cavailhès, Frankhauser, Peeters, Thomas 2010 ; Frankhauser 2015).

La distribution rang-taille des agrégats bâtis suit aussi une loi d'échelles dans le cas de certaines configurations spatiales mono- ou multi-fractales, par exemple le tapis de Sierpinski hybride présenté en Figure 40. Cependant, il n'existe à l'heure actuelle pas d'argument indiscutable permettant de déterminer si cette propriété doit représenter un objectif d'aménagement vers lequel il faudrait tendre. Si tous les bâtiments d'une ville faisaient partie du même agrégat bâti, la fragmentation des espaces non bâtis serait de fait évitée mais les stratégies d'aménagement visant à atteindre cet objectif (*i. e.* stratégies de confinement telles que les *Urban Growth Boundaries* et les *green belts*) ont pour effet secondaire l'apparition de processus de *leapfrogging* au-delà des frontières fixées par la planification (Vyn 2012 ; Peeters, Caruso, Cavailhès, Thomas, Frankhauser, Vuidel 2015). Au vu de ce constat, certains auteurs promeuvent un développement urbain polycentrique (Davoudi 2003). Il existe d'ailleurs de nombreux modèles spatiaux théoriques basés sur ce principe. Le modèle des lieux centraux de W. Christaller (1933), notamment, fournit une explication déductive à l'émergence d'un système hiérarchisé de centres et de sous-centres, sur la base d'une offre de commerces et de services hiérarchisés en termes de fréquences de recours et auxquels sont associées des aires de chalandise également différenciées en termes de tailles. Le modèle de la cité jardin d'E. Howard (1898) prévoit lui aussi une hiérarchie de centres et de sous-centres de tailles fixées. Toutefois, les études de cas empiriques qui se sont attachées à mettre en relation le polycentrisme plus ou moins affirmé de certains espaces urbains et l'organisation des flux et des déplacements dans ces espaces n'ont pas permis de mettre clairement en évidence les avantages d'une telle configuration (Aguilera 2005 ; Schwanen, Dieleman, Dijst 2001 ; Schwanen, Dijst, Dieleman 2004). Ce faisant, promouvoir un développement urbain polycentrique hiérarchisé est actuellement un parti-pris d'aménagement qui s'appuie sur un certain nombre d'arguments mais dont les avantages et les inconvénients n'ont pas encore été clairement démontrés.

Partant de l'idée qu'une structure d'ordre fractale émergerait au niveau méso- ou macroscopique à partir de processus d'auto-organiseurs, la fractalité des tissus urbains est parfois considérée comme un état "naturel" ou bien un état d'équilibre. Dans ce cas, comme le souligne C. Genre-Granpierre (2017) : « [Si] on considère que ces formes fractales auto-organisées sont satisfaisantes (voir optimales), alors l'aménagement devient "inutile" (et même gênant, puisque l'intervention humaine engendre "des déviations à la fractalité") ». Partant de cette même idée mais l'interprétant différemment, certains auteurs considèrent que les déviations à la fractalité sont le signe de dysfonctionnements : « *Multifractality represents optimal structure of human geographical systems because a fractal object can occupy its space in the most efficient way. Using the ideas from multifractals to design or plan urban and rural terrain systems, we can make the best of human geographical space*⁵⁷ » (Chen 2016) ; « (...) therefore, multifractal geometry can be employed to

56 J.A. Oliveira, O. Balaban *et al.* (2011) insistent toutefois sur le fait que l'interpénétration des habitats écologiques et des espaces urbanisés n'est pas souhaitable dans tous les cas. Il peut être en effet parfois nécessaire de couper des connectivités écologiques afin d'éviter la propagation d'espèces invasives, menaçant la biodiversité intra-urbaine, ou d'espèces sauvages susceptibles de perturber les activités humaines.

57 Y. Chen (2016) va même plus loin en émettant l'hypothèse qu'un processus d'urbanisation devrait idéalement s'arrêter au stade pour lequel le taux d'urbanisation L est égal à 0.618 et le ratio urbain-rural correspondant, qu'il nomme "*golden ratio*", égal à 1.618.

diagnose problems associated with urban growth. Normal urban structure with multiscaling properties should yield proper multifractal spectrums » (Chen & Wang 2013). Ainsi pour Y. Chen et J. Wang (2013), l'écart à une structure multifractale de l'agglomération de Pékin est le signe d'un déclin urbain. Or, dans les sections précédentes de ce chapitre, nous avons vu que les villes ou les tissus bâtis de portions de villes ne sont en général pas fractals⁵⁸. Seraient-ils tous en déclin ou bien dégénérés ? On peut en douter.

Par ailleurs, les dimensions fractales ou les spectres multifractals présentent, comme toutes mesures, des limites à la fois en termes de mode de calcul et d'interprétation. Qui plus est, une même valeur de dimension fractale peut non seulement caractériser des formes urbaines différentes mais en outre, peut être produite par des processus quantitativement et qualitativement très divers (Pumain 2017). Ainsi, les dimensions fractales ne peuvent pas être érigées en tant normes pour l'aménagement des espaces urbains et la question de la "bonne" dimension fractale, celle qui serait optimale, tombe de fait (Genre-Grandpierre 2017).

Ceci n'empêche pas de fixer une dimension fractale à atteindre pour un tissu bâti donné, en adaptant et justifiant le choix de cette dimension au regard des objectifs poursuivis, des spécificités du tissu bâti considéré et de la nature des données qui le représentent. Par exemple, dans (Tannier, Vuidel, Houot, Frankhauser 2012), nous avons estimé la dimension fractale d'auto-similarité d'un tissu bâti périurbain de l'agglomération de Besançon (égale à 1,43). Nous avons aussi calculé sa dimension fractale de corrélation (égale à 1,5). Sur cette base, nous aurions pu considérer qu'un développement résidentiel devrait avoir une valeur cible de dimension fractale supérieure à 1,46 environ. Cependant, nous avons souhaité aussi tester des scénarios avec des dimensions fractales inférieures (égales à 1,26 ou à 1) de manière à développer les secteurs de la zone d'étude caractérisés par des dimensions inférieures à 1,46 ou à accentuer la fractalité du tissu bâti pour des intervalles d'échelles pour lesquels le tissu n'était pas statistiquement auto-similaire. Dans tous les cas, si on veut maintenir une certaine hiérarchie des espaces non bâtis au sein d'un tissu bâti, la dimension fractale ne doit pas dépasser 1,8 (Frankhauser 2004).

3.1 MUP-City : simulation d'un développement résidentiel fractal sous contraintes d'accessibilité

La conception du modèle MUP-City⁵⁹ a été initiée dans le cadre du projet "Simulation fractale d'urbanisation sous contraintes d'accessibilités - Modèles et outils d'aide à la décision pour l'aménagement urbain" (2008-2010), financé par le Ministère français pour l'écologie, le développement durable et l'énergie dans le cadre du PREDIT 3. La version actuelle 1.2 du modèle est décrite dans (Tannier, Bourgeois, Frémond 2017).

MUP-City permet d'identifier des développements résidentiels potentiellement intéressants pour des villes européennes de 100 000 à 1 000 000 d'habitants environ, partant d'un tissu urbain existant. Les nouveaux développements résidentiels simulés se présentent sous la forme de cellules carrées dont la taille peut être choisie (20 m. de côté dans la plupart des applications faites jusqu'à présent). La localisation des cellules intéressantes à urbaniser est déterminée par une règle fractale

58 Accessoirement, nous avons aussi montré précédemment que les "déviations" du spectre multifractal observées par Y. Chen et J. Wang (2013) pour Pékin sont dues à des artefacts de mesure ou bien correspondent à des cas limites des mesures effectuées.

59 Conception : C. Tannier, P. Frankhauser, G. Vuidel et H. Houot. Développement informatique en Java. L'application, accompagnée de son descriptif, est disponible en ligne : <https://sourcesup.renater.fr/mupcity/>

d'urbanisation, sur la base d'une décomposition multi-échelle du tissu bâti existant (Figure 63). Outre le choix d'une dimension fractale pour les développements résidentiels simulés (correspondant à la variable N_{max} dans la Figure 63), la règle fractale d'urbanisation impose que les cellules non urbanisées au niveau de décomposition i_1 ne peuvent être urbanisées à un niveau de décomposition plus fin i_2 .

Figure 63. Exemple d'application de la règle fractale d'urbanisation de MUP-City pour N_{max} égal à 5, soit une dimension fractale égale à 1,46. Source : C. Tannier, M. Bourgeois, M. Frémond (2017).

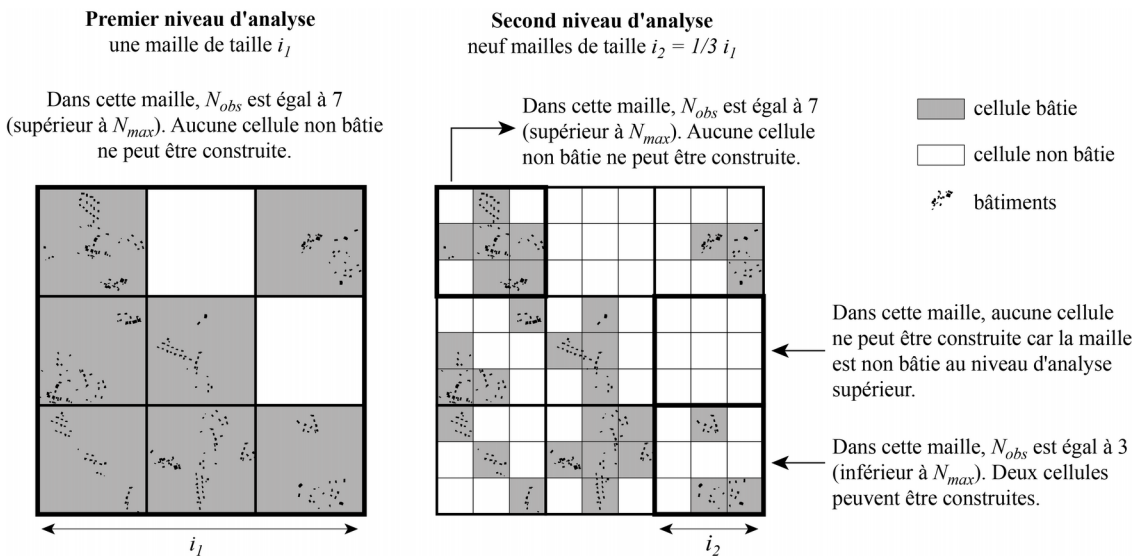
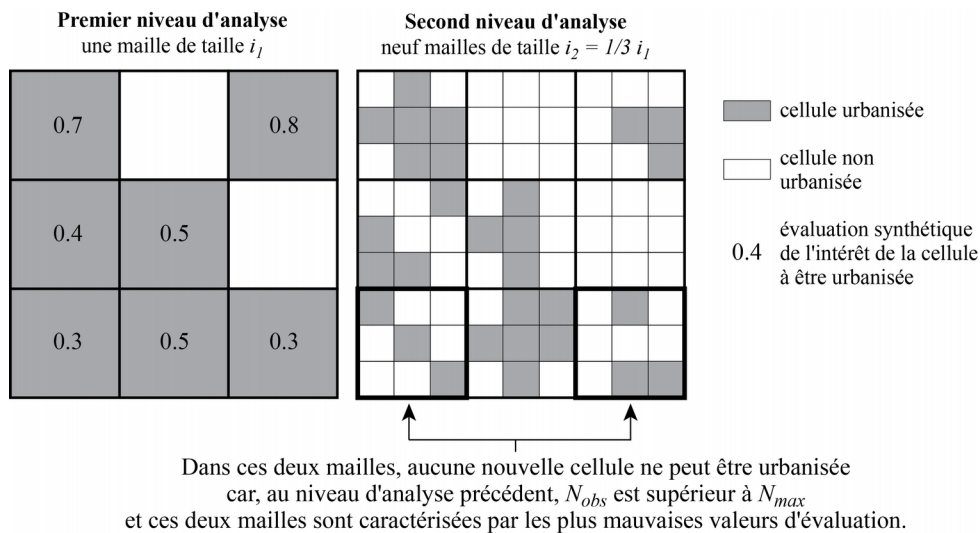


Figure 64. Variante stricte de la règle fractale d'urbanisation pour N_{max} égal à 5, soit une dimension fractale égale à 1,46.



On remarque sur la Figure 63 que certaines mailles comportent davantage de cellules urbanisées qu'il ne devrait y en avoir dans un objet statistiquement auto-similaire. Ceci est dû au fait que le tissu bâti initial n'est pas organisé selon une logique d'emboîtement d'échelles mono-fractale de facteur de réduction r égal à 3. Afin que les développements résidentiels simulés s'approchent davantage d'une auto-similarité statistique, une variante "stricte" de la règle fractale d'urbanisation a été introduite dans MUP-City (Figure 64).

Neuf règles additionnelles d'aménagement ajoutent des contraintes supplémentaires au développement résidentiel simulé :

1. Préservation du contact entre bâti et non bâti tout en minimisant la fragmentation des espaces non bâtis (règle morphologique)
2. Proximité au réseau routier existant
3. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation quotidienne
4. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation hebdomadaire
5. Bonne accessibilité aux commerces et services de fréquentation mensuelle ou plus rare
6. Bonne accessibilité au réseau de transport en commun
7. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle quotidienne
8. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle hebdomadaire
9. Bonne accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation potentielle mensuelle ou plus rare

Les distances sont calculées sur le réseau des routes et chemins.

Chaque règle additionnelle d'aménagement est représentée par une valeur d'évaluation comprise entre 0 et 1 pour chacune des cellules. Ces différentes valeurs d'évaluation sont ensuite agrégées en une valeur synthétique d'intérêt de chaque cellule à être urbanisée. Tout ou partie des règles peuvent être appliquées pour effectuer une simulation de développement résidentiel. Le poids de chacune des règles dans l'évaluation synthétique de l'intérêt des cellules à être urbanisées peut être différent d'une simulation à une autre, de manière à représenter différentes orientations d'aménagement.

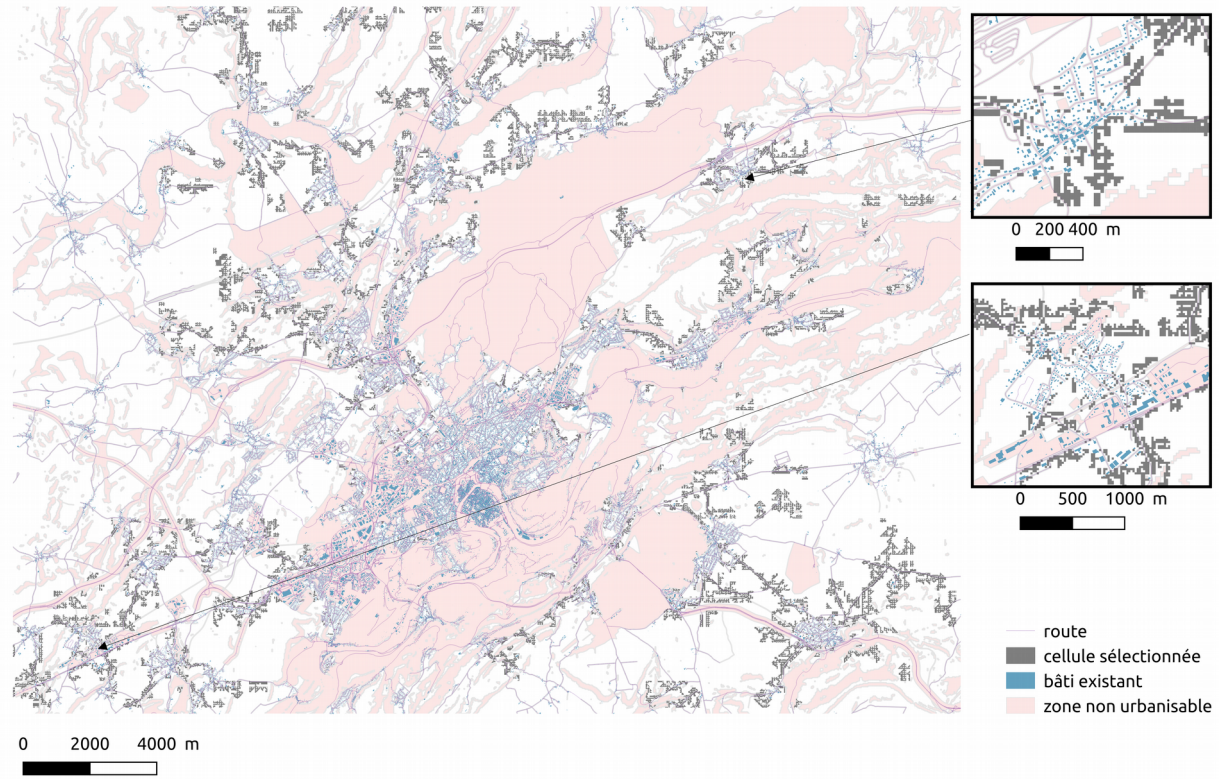
Tableau 28. Modélisation multi-échelle dans MUP-City. Source : C. Tannier, M. Bourgeois, M. Frémond (2017).

Règle d'aménagement	Représentation dans MUP-City
Règle fractale d'urbanisation	Résolutions spatiales emboîtées
Prise en compte des zones non-urbanisables	Résolutions spatiales emboîtées
Règle morphologique	Résolutions spatiales emboîtées
Règle de proximité à la route	Taille du voisinage (en nombre de cellules) variable en fonction de la résolution spatiale considérée
Règles d'accessibilité	Portées spatiales (distances maximales acceptables) variables en fonction de la nature et de la fréquence de recours des commerces et services ou des infrastructures vertes et de loisir considérés Portées spatiales fixes à travers les résolutions spatiales

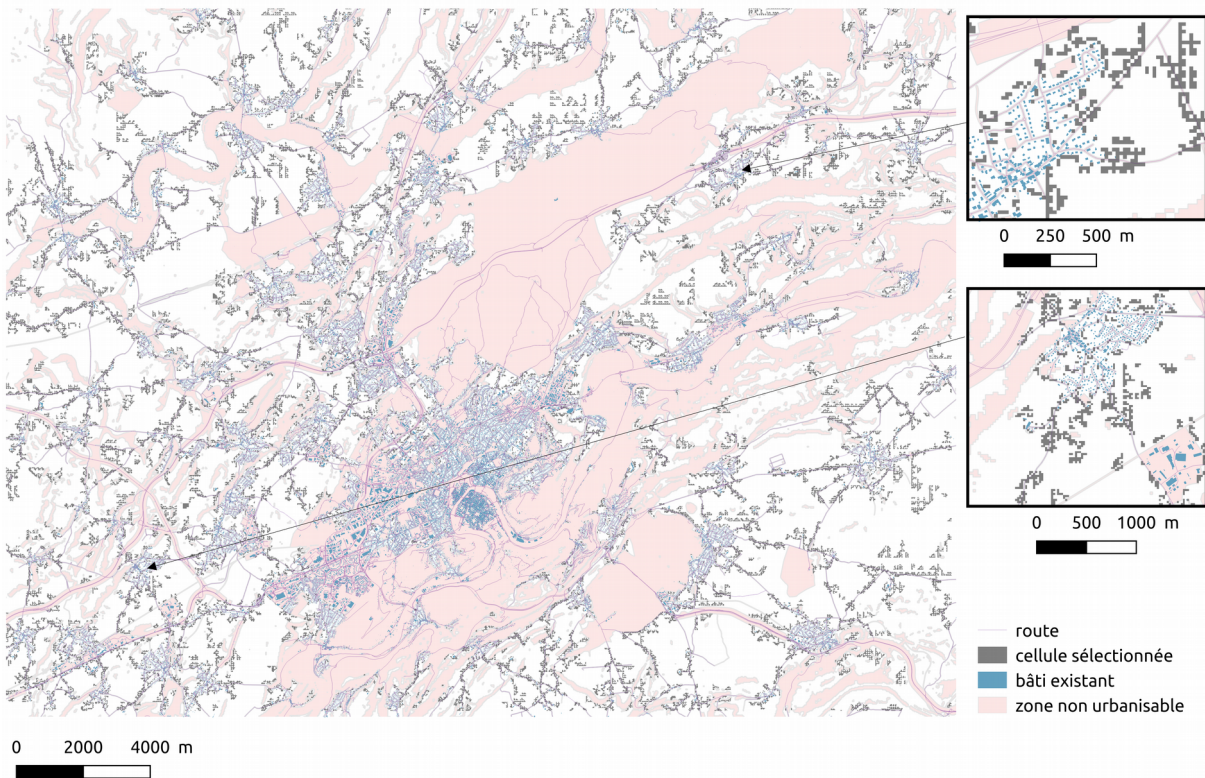
MUP-City est un modèle multi-échelle de par la prise en compte de résolutions spatiales et de portées spatiales variables (Tableau 28). La prise en compte de zones non urbanisables (zones naturelles protégées, zones de fortes pentes, zones inondables...) s'inscrit dans une logique multi-échelle car si une maille contient une part de surface non constructible supérieure à la part de surface urbanisable, alors la maille n'est pas urbanisable. En revanche, si une maille contient une part de surface non constructible inférieure à la part de surface urbanisable, alors la maille peut être urbanisée. Dans ce cas, les zones non constructibles empêcheront l'urbanisation quand on considérera des mailles de plus petite taille.

Figure 65. Deux exemples de résultat obtenu avec MUP-City sur l'agglomération de Besançon. N_{max} est égal à 5, soit une dimension fractale égale à 1,46. Source : M. Colomb, M. Brasebin, J. Perret, C. Tannier (2017).

(a) Règle fractale "basique"



(b) Règle fractale "stricte"



MUP-City permet de simuler des formes de développements résidentiels très différentes (Figure 65). Les développements simulés correspondent à une densification des tissus bâtis existants, via l'augmentation de leur dimension fractale locale, et/ou en la création de nouvelles extensions résidentielles morphologiquement auto-similaires. On remarque que ces extensions ont pour conséquence un accroissement de la longueur de la bordure urbanisée. On remarque aussi que simuler un développement résidentiel fractal permet d'obtenir, à un niveau local, des formes visuellement réalistes de développement résidentiel. Quand la dimension fractale est proche de 1,5, les tissus bâtis sont caractérisés par une grande diversité de tailles des agrégats bâtis et de distances entre ces agrégats. Inversement, avec une dimension fractale proche de 2, les bâtiments sont soit uniformément concentrés, soit uniformément dispersés.

MUP-City permet d'identifier des localisations intéressantes pour un développement résidentiel. Ensuite, afin d'obtenir des scénarios prospectifs réalistes, c'est-à-dire qui représentent des futurs plausibles, sinon possibles, de la croissance résidentielle, il est nécessaire de sélectionner un sous-ensemble de cellules parmi celles identifiées comme intéressantes à urbaniser au moyen de MUP-City. Les critères pour effectuer cette sélection peuvent tenir compte d'autres règles d'aménagement aux niveaux macro- ou méso-géographiques (par exemple, préconisations du SCoT : schéma de cohérence territoriale ou du PLH : programme local de l'habitat), ou au niveau micro-géographique (par exemple, réglementation du PLU : plan local d'urbanisme).

Dans le cadre de trois recherches doctorales, MUP-City intervient de différentes manières dans une démarche de conception de scénarios réalistes de développement résidentiel. Dans le cadre de la conception de scénarios prospectifs pour le Grand Duché du Luxembourg à l'horizon 2030 réalisés par M. Frémond (2015), MUP-City est utilisé à la fin de la démarche de conception des scénarios (Figure 66). Dans le cadre la simulation de scénarios de développements résidentiels pour l'aire urbaine de Besançon, M. Bourgeois (2015) utilise des résultats de MUP-City en entrée du modèle de simulation du développement résidentiel MobiSim-DR (Figure 67). Enfin dans le cadre de la thèse de M. Colomb⁵⁸, MUP-City intervient en début du processus (Figure 68), les résultats finaux de simulation étant produit par l'application SimPLU (Brasebin 2014), qui permet la création de bâtiments en 3D au sein d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles.

La comparaison des Figures 66, 67 et 68 montre que les niveaux macro-, méso- et micro-géographiques ne concernent pas les mêmes entités (socio)-spatiales dans les trois cas. On constate aussi que, dans les thèses de M. Frémond et M. Bourgeois, un zonage méso-géographique sert à la sélection d'un sous-ensemble de cellules parmi le total des cellules identifiées comme intéressantes à urbaniser en sortie de simulation avec MUP-City. Inversement, dans la thèse de M. Colomb, les cellules intéressantes à urbaniser en sortie de simulation avec MUP-City servent à sélectionner des parcelles à urbaniser.

58 Recherche doctorale en cours au laboratoire COGIT (Institut National de l'Information Géographique et Forestière, Saint-Mandé), co-dirigée par J. Perret et C. Tannier et encadrée par M. Brasebin.

Figure 66. Démarche de construction de scénarios prospectifs pour le Grand-Duché du Luxembourg adoptée par M. Frémond (2015).

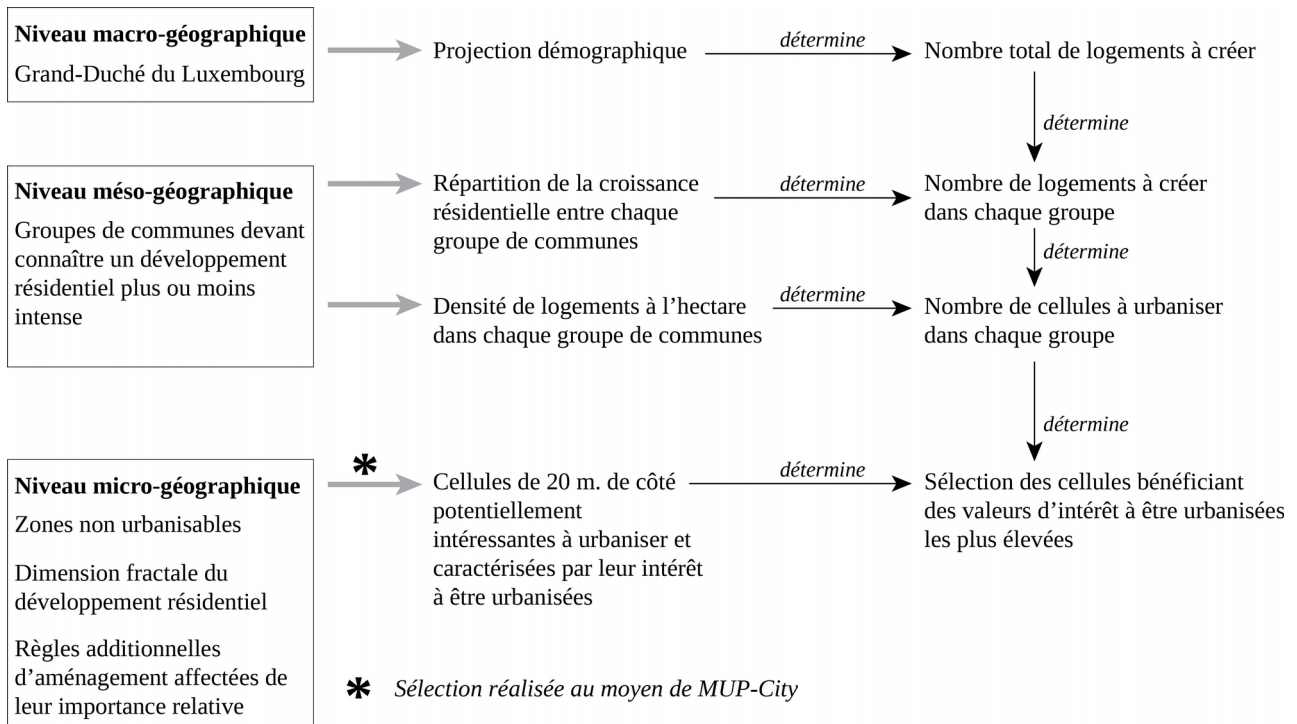


Figure 67. Intégration de résultats de MUP-City en input de MobiSim-DR.

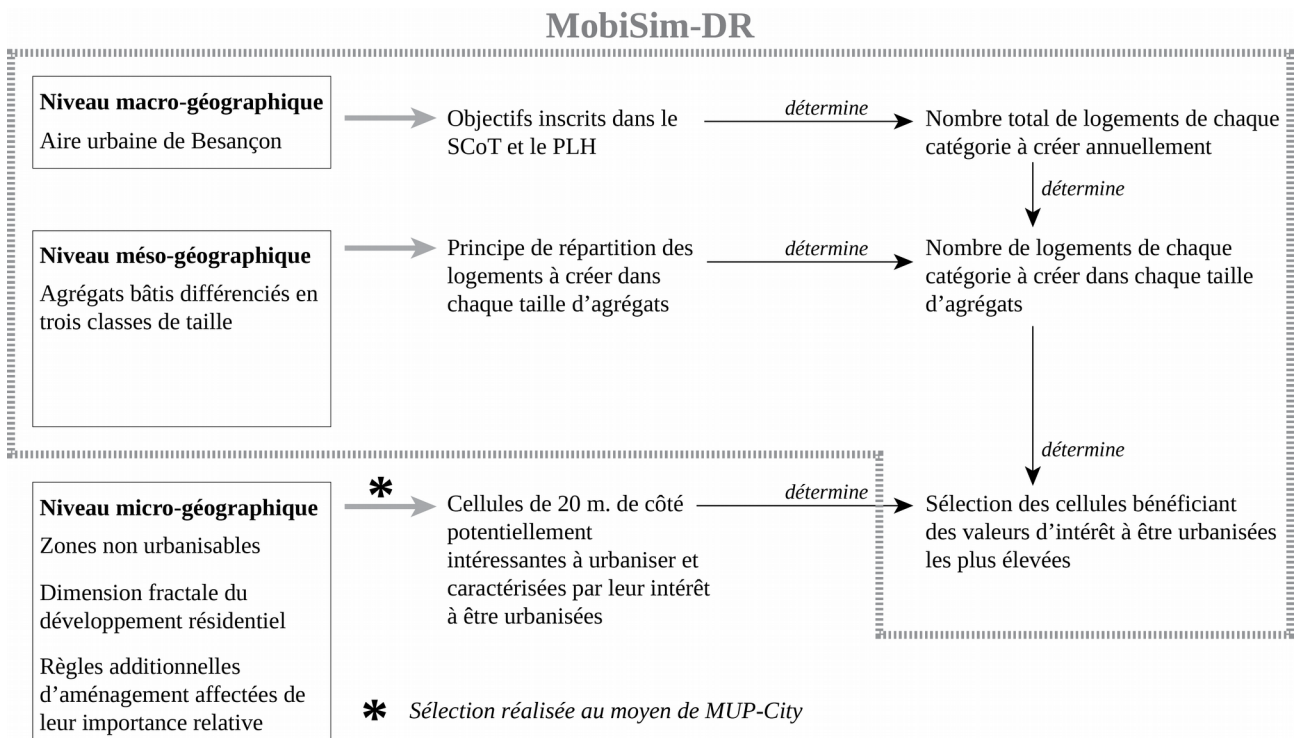
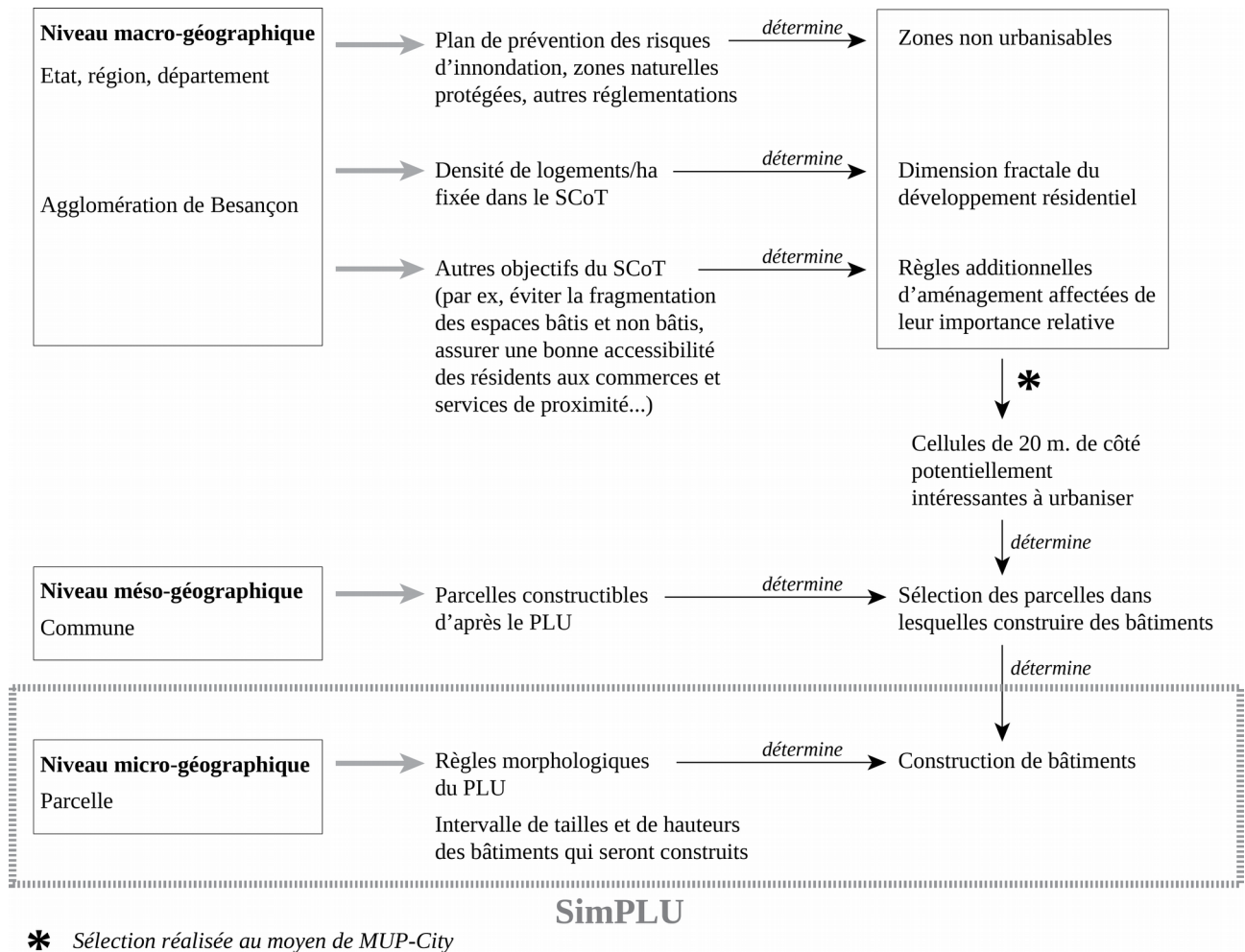


Figure 68. Couplage de MUP-City avec SimPLU réalisé dans le cadre de la thèse de M. Colomb.



Dans les trois thèses, le paramétrage des règles déterminant la forme du développement résidentiel dans MUP-City n'est pas le même (Tableaux 29 et 30). En effet, non seulement les scénarios sont différents (en réponse à des objectifs également différents) mais en outre, les configurations spatiales des infrastructures vertes et de loisir ainsi que des commerces et services diffèrent nettement entre le Grand Duché du Luxembourg et l'agglomération de Besançon. Par ailleurs, pour les scénarios concernant Besançon, la dimension fractale du développement résidentiel simulé avec MUP-City varie entre 1,46 et 1,77. Pour les scénarios concernant le Luxembourg, la dimension fractale a été fixée à 1,77 et ne varie pas.

Tableau 29. Valeur d'importance accordée aux différentes règles d'aménagement de MUP-City dans les thèses de M. Frémond (2015) et de M. Bourgeois (2015). Source : C. Tannier, M. Bourgeois, M. Frémond (2017).

Intitulé de la règle	Grand-Duché du Luxembourg		Aire urbaine de Besançon	
	Favoriser l'accessibilité aux commerces et services	Favoriser l'accessibilité aux transports en commun	Favoriser l'accessibilité aux commerces et services	Favoriser l'accessibilité aux transports en commun
Règle morphologique	0,295	0,279	0.749	0.411
Proximité au réseau routier existant	0,383	0,279	0.233	0.201
Proximité aux stations de transport en commun	0,474	3,944	1.05	2.876
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation quotidienne	3,396	0,700	2.406	1.053
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation hebdomadaire	1,618	0,700	0.507	0.460
Accessibilité aux commerces de services de fréquentation mensuelle ou plus rare	0,835	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation quotidienne	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation hebdomadaire	0,564	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>
Accessibilité aux espaces naturels et de loisir de fréquentation mensuelle ou plus rare	0,435	0,700	<i>Non considérée</i>	<i>Non considérée</i>

Tableau 30. Normes d'accessibilité choisies pour les différentes règles d'aménagement de MUP-City dans les thèses de M. Frémond (2015) et de M. Bourgeois (2015). Source : C. Tannier, M. Bourgeois, M. Frémond (2017).

	Distance maximale acceptable	
	Grand-Duché du Luxembourg	Aire urbaine de Besançon
Commerces de services de fréquentation quotidienne	400 m.	400 m.
Commerces de services de fréquentation hebdomadaire	2 000 m.	2 000 m.
Commerces de services de fréquentation mensuelle ou plus rare	15 min.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation quotidienne	400 m.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation hebdomadaire	2 000 m.	<i>Non considérée</i>
Espaces naturels et de loisir de fréquentation mensuelle ou plus rare	5 000 m.	<i>Non considérée</i>
Stations de transport en commun : bus ou tramway	300 m.	400 m.
Stations de transport en commun : train	500 m.	3 000 m.

L'intérêt de simuler des scénarios de développement résidentiel réalistes à résolution spatiale fine est de pouvoir ensuite en évaluer les conséquences en termes socio-spatiaux et environnementaux. Des tentatives en ce sens ont déjà été réalisées, par exemple :

- pour différents scénarios de développement résidentiel dans le Grand-Duché du Luxembourg, étude des parts modales, distances parcourues et temps de transport des individus à l'aide du modèle de simulation des mobilités quotidiennes individuelles MobiSim-MQ (Antoni, Lunardi, Vuidel 2016) (Frémond 2015) ;
- pour différents scénarios de développement résidentiel dans l'aire urbaine de Besançon, étude des effets de barrière des espaces urbanisés et du trafic routier (simulé avec MobiSim-MQ) sur la connectivité des habitats de différentes espèces animales (indices de connectivité calculés avec le logiciel Graphab (Foltête, Clauzel, Vuidel 2012)) (Tannier, Bourgeois, Foltête, Houot 2016) ;
- pour différents scénarios de développement urbain dans l'agglomération de Strasbourg⁵⁹, étude de leurs impacts sur l'îlot de chaleur urbain (avec le modèle *WRF/urban climate modeling system*) et les dépenses énergétiques nécessaires au chauffage des bâtiments (avec le modèle *Building Energy Model*) (Kohler, Tannier, Blond, Aguejdad, Clappier 2017).

De telles études dites "intégrées" s'appuient l'enchaînement de différents modèles, dont certains peuvent être très compliqués, et nécessitent un grand nombre de données pour leur paramétrage et en entrée de simulation. Leur mise en œuvre requiert donc un investissement lourd. Dans certains cas, qui plus est, les résultats finaux obtenus révèlent surtout des aspects encore mal connus des processus modélisés et ne permettent pas de répondre clairement à la question thématique initialement posée. Tel est notamment le cas du travail de M. Kohler *et al.* (2017). De telles études demeurent donc actuellement du domaine de la recherche et non de celui de l'application en aménagement.

3.2 Fractalopolis : conception de plans multifractals de développement urbain

La conception du modèle Fractalopolis⁶⁰ a été initiée dans le cadre du projet "VilModes : ville et mobilités durables - Évaluation par la simulation" (2012-2014), dirigé par J.-P. Antoni et financé par le Ministère français pour l'écologie, le développement durable et l'énergie dans le cadre du PREDIT 3. La version actuelle 1.0 du modèle est décrite dans l'article de P. Frankhauser, C. Tannier, G. Vuidel et H. Houot (*sous presse*).

Nous avons vu précédemment dans ce mémoire que définir ce que devrait être une "bonne" forme urbaine, qui permettrait d'assurer un développement durable, est extrêmement difficile car les phénomènes impliqués sont très nombreux et diversifiés, et leurs relations sont complexes et souvent mal connues. Par conséquent, les recommandations en matière d'aménagement se contredisent souvent. Conscients de ces difficultés, nous avons néanmoins choisi de retenir cinq principes d'aménagement qui, généralement, sont reconnus pour avoir davantage d'effets positifs que négatifs sur le fonctionnement des espaces urbains :

59 Simulations effectuées avec le logiciel SLEUTH* (Houet, Aguejdad, Doukari, Battaia, Clarke 2016).

60 Conception : P. Frankhauser, C. Tannier et G. Vuidel. Développement informatique en Java. L'application, accompagnée de son descriptif, est disponible en ligne : <https://sourcesup.renater.fr/fractalopolis/>

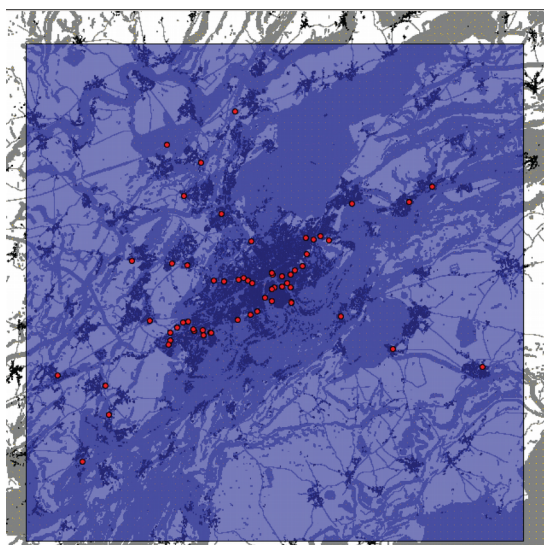
- un développement urbain polycentrique hiérarchisé afin d'améliorer l'accessibilité à une large gamme de commerces, services et infrastructures vertes et de loisir de fréquentation quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou plus rare ;
- un développement "orienté transport" (*transit-oriented development*) qui concentre la croissance résidentielle le long des axes de transport public ;
- un développement résidentiel localement concentré afin de favoriser un accès aisé à pied ou en vélo aux commerces, services et infrastructures vertes et de loisir souvent fréquentées ;
- la pénétration d'espaces verts et naturels au sein des espaces bâtis à différentes échelles afin d'en permettre un accès aisé aux résidents et de créer des corridors de ventilation reliant les centres urbains aux zones rurales extérieures, aidant ainsi à préserver une bonne qualité de l'air et une entrée d'air frais la nuit au sein des espaces intra-urbains ;
- la préservation de réseaux interconnectés de zones vertes et naturelles ayant des tailles variées afin de préserver la biodiversité.

En pratique, pour la conception de plans d'aménagement urbain, ces cinq principes d'aménagement sont difficilement applicables conjointement en raison de l'absence d'un cadre formel intégrateur. La modélisation multifractale, à la base du modèle Fractalopolis, permet de les combiner au moyen d'une formalisation intégrée et cohérente. A cet effet, il comporte trois modèles articulés les uns avec les autres. Le premier définit le nombre, la localisation, la surface et le niveau fonctionnel de centres de développement planifié. Le deuxième permet d'évaluer l'accessibilité aux commerces, services et infrastructures vertes et de loisir dans les différents centres de développement. Le troisième sert à distribuer dans les centres un nombre donné de logements prévus à la construction.

Localisation et hiérarchisation des centres de développement planifié

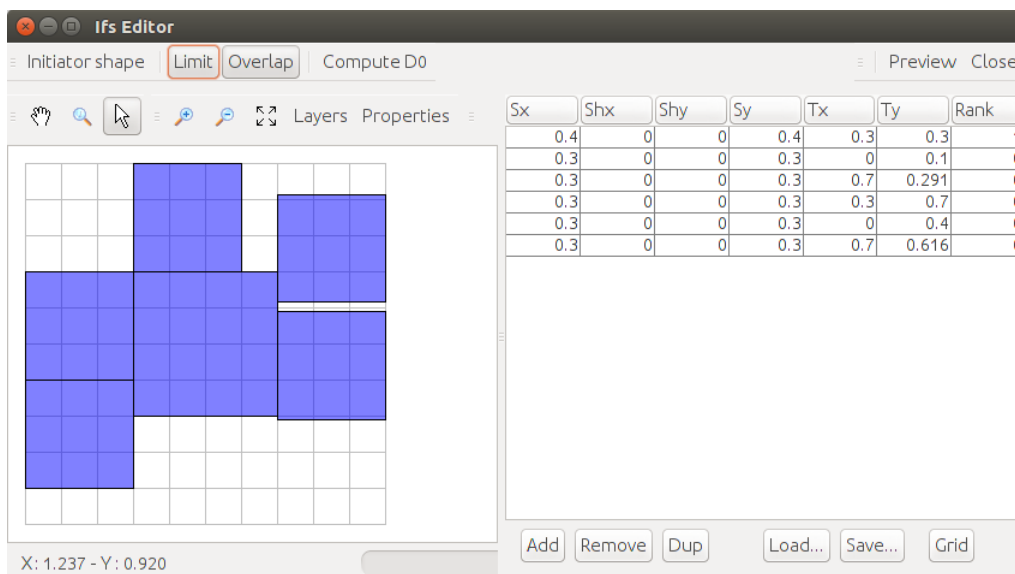
Deux types de zones sont distinguées dans Fractalopolis : celles favorables au développement urbain (nommées centres de développement planifié) et celles dans lesquelles seul un faible développement est envisagé, voire aucun développement. L'initiateur d'un plan de développement conçu avec Fractalopolis est un carré de taille L positionné sur la zone d'étude (Figure 69).

Figure 69. Un exemple d'initiateur positionné sur l'agglomération de Besançon (Est de la France).



Ensuite, la création du plan suit une logique itérative basée sur la définition et l'application d'un système de fonctions itérées (*Iterated function system* - IFS) (Barnsley 1988). Le générateur du plan contient en général un carré central de taille choisie $S_1 = r_1 \times L$, placé sur le centre urbain principal, et N carrés de taille plus petite $S_0 = r_0 \times L$ placés sur les centres de développement secondaires (Figure 70). Le nombre de centres secondaires, la valeur des paramètres r_0 et r_1 et le nombre de niveaux fonctionnels (en général trois ou quatre, correspondant au nombre d'itérations pour lequel l'IFS est appliqué) sont définis spécifiquement pour chaque cas d'étude. L'IFS choisi pour créer un plan de développement multifractal est appliqué itérativement jusqu'à ce que les plus petits carrés aient approximativement la taille des quartiers. A cette étape d'itération, la longueur de leur côté varie entre 500 m. et 300 m. environ. Un plan de développement construit sur cette base est dit multifractal car le générateur du plan comporte plusieurs facteurs de réduction r (Mandelbrot 1982). S'il n'en comportait qu'un seul, il serait monofractal.

Figure 70. Définition d'un IFS dans Fractalopolis 1.0 (copie d'écran). Le carré correspondant au centre principal a le rang numéro 1 tandis que les carrés correspondant aux centres secondaires ont les rangs numéro 0.

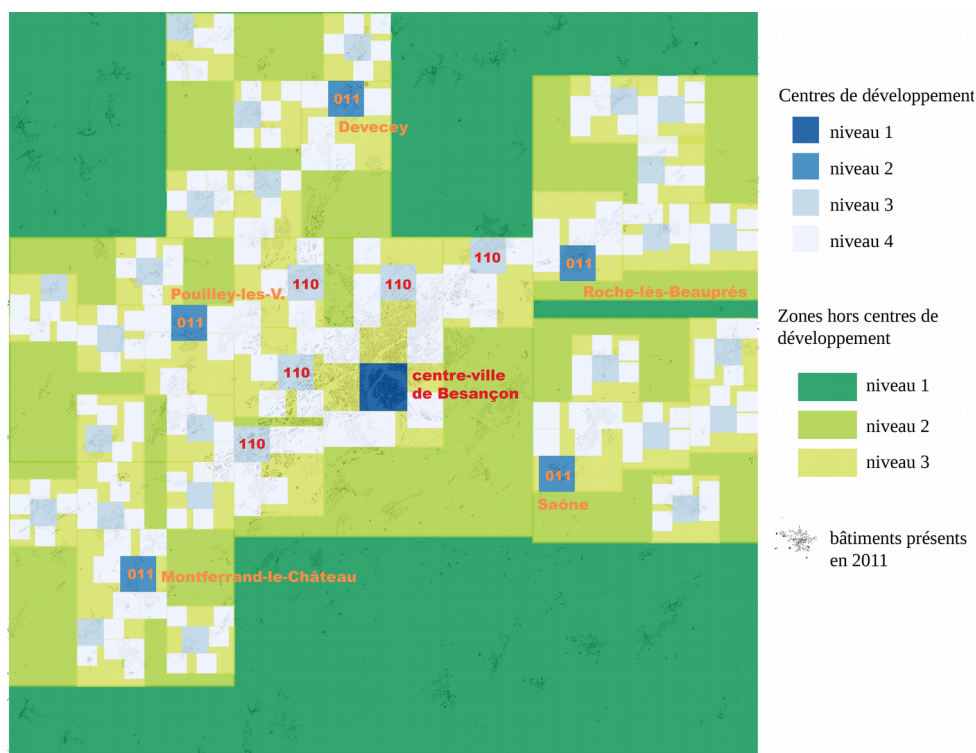


Évaluation de l'accessibilité aux commerces, services, infrastructures vertes et de loisir dans chaque centre

Dans Fractalopolis, la taille de l'aire de chalandise de chaque centre de développement dépend de son niveau fonctionnel. L'hypothèse est que les habitants d'un centre donné fréquentent majoritairement les commerces, services et infrastructures vertes et de loisir (globalement dénommés par la suite "services" pour simplifier) présents dans l'aire de chalandise autour du centre dans lequel ils résident. Cette aire de chalandise correspond au carré généré à l'étape d'itération précédant celle à laquelle le centre a été créé. Par exemple, dans un plan correspondant à la troisième étape d'itération d'un IFS, donc comportant trois niveaux de services, l'aire de chalandise des services de fréquentation mensuelle est l'initiateur du plan. Si le plan correspondait à la quatrième étape d'itération, donc comportait quatre niveaux fonctionnels, l'initiateur représenterait l'aire de chalandise des services de fréquentation rare. Suivant la même logique et considérant un plan correspondant à la troisième étape d'itération d'un IFS, l'aire de chalandise des services de

fréquentation hebdomadaire est le carré généré à la première étape d'itération et l'aire de chalandise des services de fréquentation quotidienne est le carré généré à la seconde étape d'itération. Dans la Figure 71, les délimitations des zones hors centres de développement correspondent aux aires de chalandise des services de fréquentation quotidienne (niveau 3), hebdomadaire (niveau 2) et mensuelle (niveau 1).

Figure 71. Niveaux fonctionnels des centres dans un plan multifractal de développement de l'agglomération de Besançon (Est de la France). Les nombres inscrits en couleur rouge et orange correspondent aux codes des centres choisis pour un développement résidentiel prioritaire.



Sur cette base, l'accessibilité de chaque centre aux commerces et services de chaque fréquence de recours, d'une part, et aux infrastructures vertes et de loisirs de chaque fréquence de recours, d'autre part, est calculée. Les règles de calcul sont décrites dans l'article (Frankhauser, Tannier, Vuidel, Houot *sous presse*). D'autres règles permettent d'agrèger ces valeurs d'accessibilité en des indicateurs d'évaluation synthétiques : (1) évaluation synthétique de l'accessibilité aux commerces et services et infrastructures vertes et de loisirs de même fréquence de recours et (2) évaluation synthétique de l'accessibilité à tous les types de services. Formellement, les règles d'agrégation sont des moyennes pondérées. Les poids intervenant dans chaque agrégation représentent l'importance relative de chaque type de services pour les habitants, en fonction du niveau fonctionnel du centre dans lequel ils résident. Ces poids doivent être choisis de manière à renforcer plus ou moins la hiérarchie fonctionnelle dans la zone d'étude. Par exemple, plus d'importance peut être accordée à l'accessibilité aux commerces et services qu'à l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisirs pour les centres du premier niveau fonctionnel (*i. e.* le centre urbain principal). Inversement, l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisirs peut être considérée comme plus importante que l'accessibilité aux commerces et services pour les centres du troisième ou quatrième niveau

fonctionnel (*i. e.* les petits centres périurbains). L'importance relative de l'accessibilité aux commerces et services *versus* l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisirs peut aussi varier selon la fréquence de recours considérée. Par exemple, pour les centres du troisième ou quatrième niveau fonctionnel, on peut considérer que l'accessibilité aux commerces et services est plus importante que l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisirs pour des fréquences de recours mensuelles tandis que les deux types d'accessibilité sont également importantes pour des fréquences de recours quotidiennes. Inversement, pour les centres du premier niveau fonctionnel, on peut considérer que l'importance relative de l'accessibilité aux commerces et services *versus* l'accessibilité aux infrastructures vertes et de loisirs est à peu près la même pour toutes les fréquences de recours.

Distribution spatiale du développement résidentiel

La zone d'étude comporte un nombre donné ν de logements, qui peut être soit le nombre actuel de logements, soit le nombre à atteindre à une certaine date. Parmi ces logements, certains sont localisés dans les centres de développement et d'autres, en dehors des centres. La part de logements localisés dans les centres à la première étape d'itération est notée α ; à la deuxième étape d'itération, elle est notée β ; à la troisième étape d'itération, elle est notée γ ; etc. Par définition, les valeurs de α , β , et γ sont comprises entre 0 et 1. Ainsi, à la première étape d'itération, $\alpha \nu$ logements sont localisés dans les centres de développement tandis que $(1 - \alpha)\nu$ logements sont localisés en-dehors. A la seconde étape, $\alpha \beta \nu$ logements sont localisés dans les centres de développement tandis que $\alpha(1 - \beta)\nu$ logements sont localisés en-dehors, etc.

Ensuite, à chaque étape d'itération, le nombre total de logements dans les centres de développement, par exemple $\alpha \beta \gamma \nu$ à la troisième étape, est réparti entre les différents centres en fonction de leur niveau fonctionnel et de leur surface. La combinaison du niveau fonctionnel et de la surface de chaque centre est défini par l'IFS et traduit numériquement au moyen d'un système de codage introduit à cet effet dans Fractalopolis. Les paramètres correspondant, dans le modèle de distribution spatiale des logements, sont notés a , b , c , etc. Ces deux aspects du modèle sont détaillés dans l'article (Frankhauser, Tannier, Vuidel, Houot *sous presse*).

Un point important à noter est qu'en raison de la présence de deux facteurs de réduction dans le générateur d'un plan de développement, la surface de chaque centre dépend de sa position relative, c'est-à-dire de sa distance aux centres de niveau supérieur. Par conséquent, la surface de centres de différents niveaux hiérarchiques peut être identique tandis que la surface de centres de même niveau hiérarchique peut être différentes, cf. Figure 71. En ceci, le modèle diffère du modèle des lieux centraux de Christaller mais correspond à l'observation empirique selon laquelle les centres d'un même niveau fonctionnel sont plus étendus quand ils sont localisés à proximité d'un centre urbain important et moins étendus quand ils sont localisés dans des zones peu peuplées.

Exemple d'application : conception d'un plan de développement multifractal pour l'agglomération de Besançon (Est de la France)

Cette agglomération comptait environ 200 000 habitants en 2011, parmi lesquels 117 000 environ étaient localisés dans la commune de Besançon. Le plan de développement multifractal de l'agglomération, conçu avec Fractalopolis, part d'une situation initiale en 2011 et fixe des objectifs à atteindre en 2026. Le générateur du plan comporte un centre principal (premier niveau fonctionnel) et cinq centres secondaires (deuxième niveau fonctionnel) (Figure 72). La différence de taille entre les éléments du générateur est faible afin de correspondre à l'organisation spatiale de la zone

d'étude. Le centre principal est positionné sur la commune de Besançon. Les centres secondaires sont positionnés sur des communes périurbaines bien desservies par les transports en commun : Saône, Pouilley-les-Vignes, Monferrand-le-Château, Devecey et Roche-lès-Beauprés.

Figure 72. Générateur de l'IFS choisi pour un plan de développement multifractal de l'agglomération de Besançon (Est de la France). En gris : zones non urbanisables. Points rouges : stations de transports en commun.

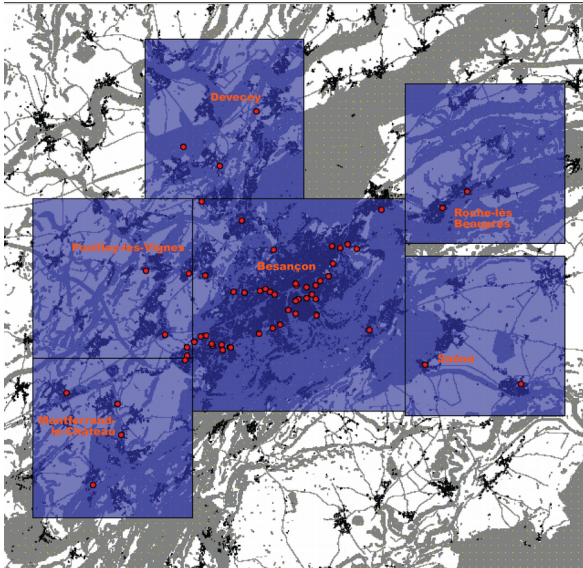
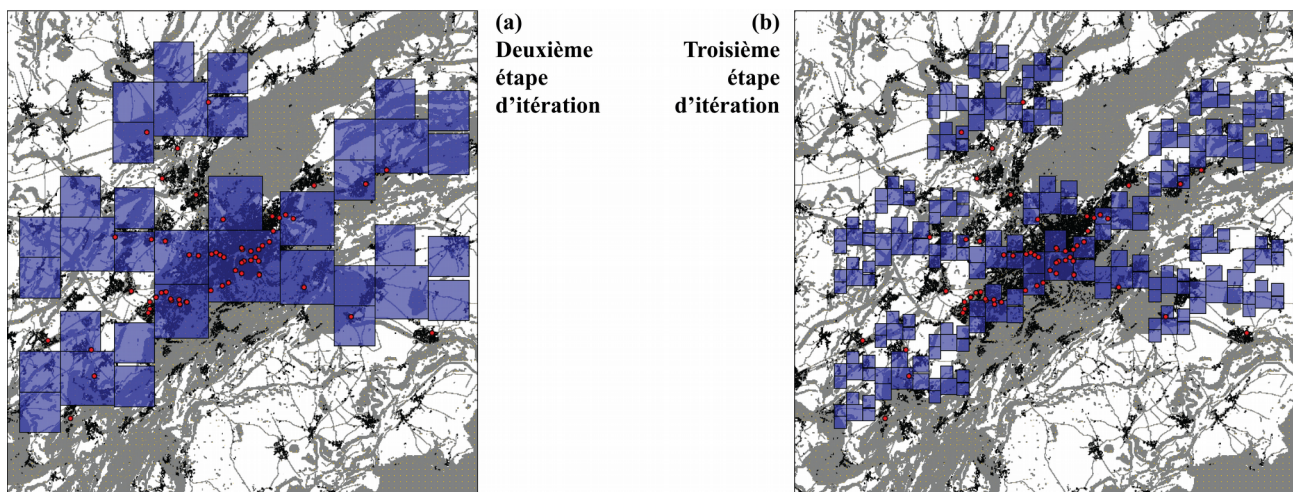


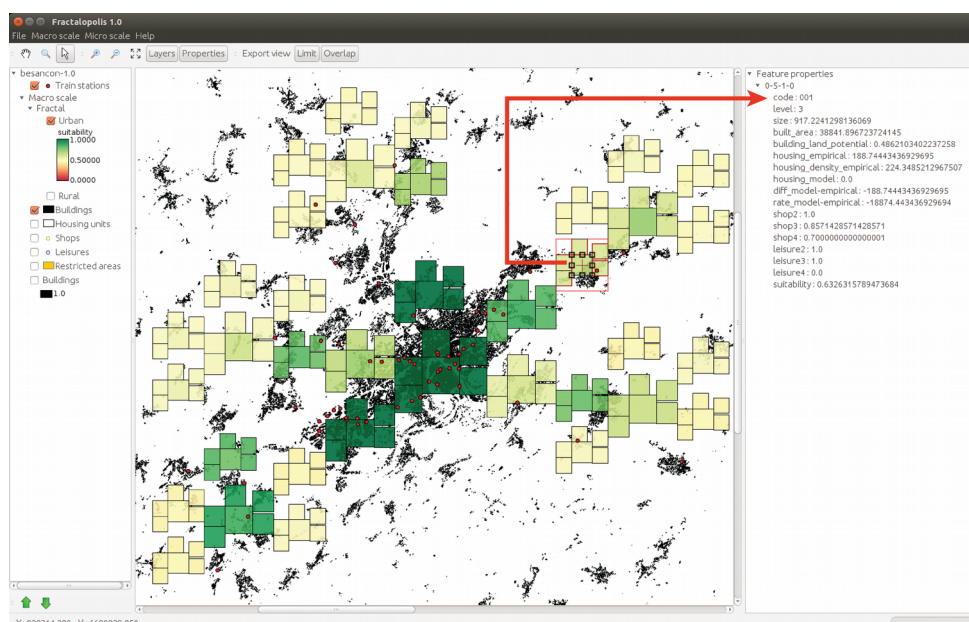
Figure 73. Configuration multifractale résultant de la stricte réplique du générateur présenté en Figure 72. En gris : zones non urbanisables. Points rouges : stations de transports en commun.



La Figure 73 montre la configuration multifractale résultant de la réplique du générateur aux deuxième et troisième étapes d'itération. Cette configuration géométriquement régulière doit être modifiée de façon à correspondre à la localisation des centres urbains et périurbains existants. Le déplacement des carrés vis-à-vis de leur position initialement définie par le générateur s'effectue manuellement mais Fractalopolis aide à respecter un certain nombre de règles présidant au déplacement des carrés.

- 1) Afin de conserver le caractère statistiquement auto-similaire du plan multifractal, les carrés représentant chaque centre de développement ne peuvent pas se chevaucher dans Fractalopolis. De plus, les carrés ne peuvent pas recouvrir des espaces localisés hors des centres de développement et ayant été générés aux étapes d'itération précédentes (qui sont principalement, dans le cas de Besançon, des espaces naturels et agricoles). Ceci garantit à la fois la préservation d'espaces non bâtis connectés les uns aux autres (c'est-à-dire, des réseaux écologiques existants ou potentiels, composés de taches d'habitat de différentes tailles) et la pénétration d'espaces non bâtis au sein des espaces bâtis à différentes échelles.
- 2) Des coulées vertes et des corridors verts doivent être préservés. A la première et deuxième étapes d'itération, comme les carrés représentant les centres de développement sont très larges, ils peuvent recouvrir des zones non urbanisables. Ensuite, au fur et à mesure des itérations, les carrés deviennent plus petits et il est possible de les positionner de manière à préserver les zones non urbanisables.
- 3) Les centres de niveaux fonctionnels les plus élevés doivent être desservis par les transports en commun. Cette règle n'est pas imposée dans Fractalopolis mais elle doit être respectée par le concepteur d'un plan de développement.
- 4) Un bon accès aux services doit être assuré. Pour ce faire, l'accessibilité de chaque centre est représentée au moyen d'un code couleur dans Fractalopolis (Figure 74). A chaque fois qu'un carré est déplacé, l'ensemble de ses indicateurs d'accessibilité sont automatiquement recalculés.

Figure 74. Evaluation synthétique de l'accessibilité de chaque centre de la Figure 73b. Copie d'écran de Fractalopolis 1.0 - Comme l'indique la flèche de couleur rouge, l'ensemble des propriétés d'un centre donné peuvent être affichées en cliquant sur celui-ci.



Le respect de ces règles de déplacement des carrés en travaillant sur le plan à la deuxième étape d'itération, a permis de placer les sous-centres du troisième niveau fonctionnel autour du centre-ville, à proximité des stations de transport en commun (cf. Figure 75a à comparer avec la Figure 73a). Puis en travaillant sur le plan à la troisième étape d'itération, la position des carrés a été

choisie de manière à garantir la meilleure accessibilité possible et à préserver les zones non urbanisables. Ainsi, les carrés recouvrent moins de zones non urbanisables dans la Figure 75b que dans la Figure 73b. De plus, les évaluations de l'accessibilité des centres dans la Figure 76 est souvent meilleure que dans la Figure 74.

Figure 75. Un plan multifractal de développement pour l'agglomération de Besançon (Est de la France). En gris : zones non urbanisables. Points rouges : stations de transports en commun.

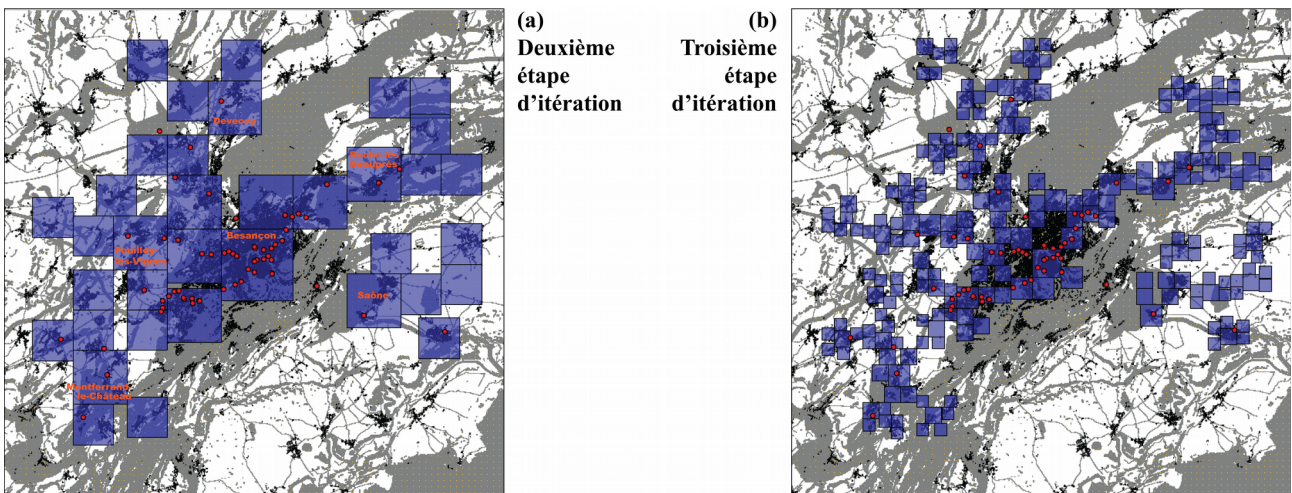
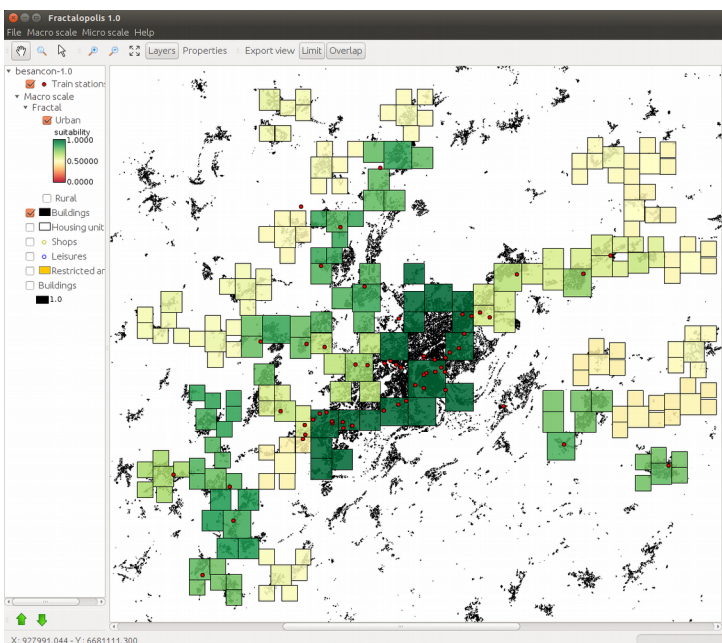


Figure 76. Evaluation synthétique de l'accessibilité de chaque centre de la Figure 75b (copie d'écran de Fractalopolis 1.0).

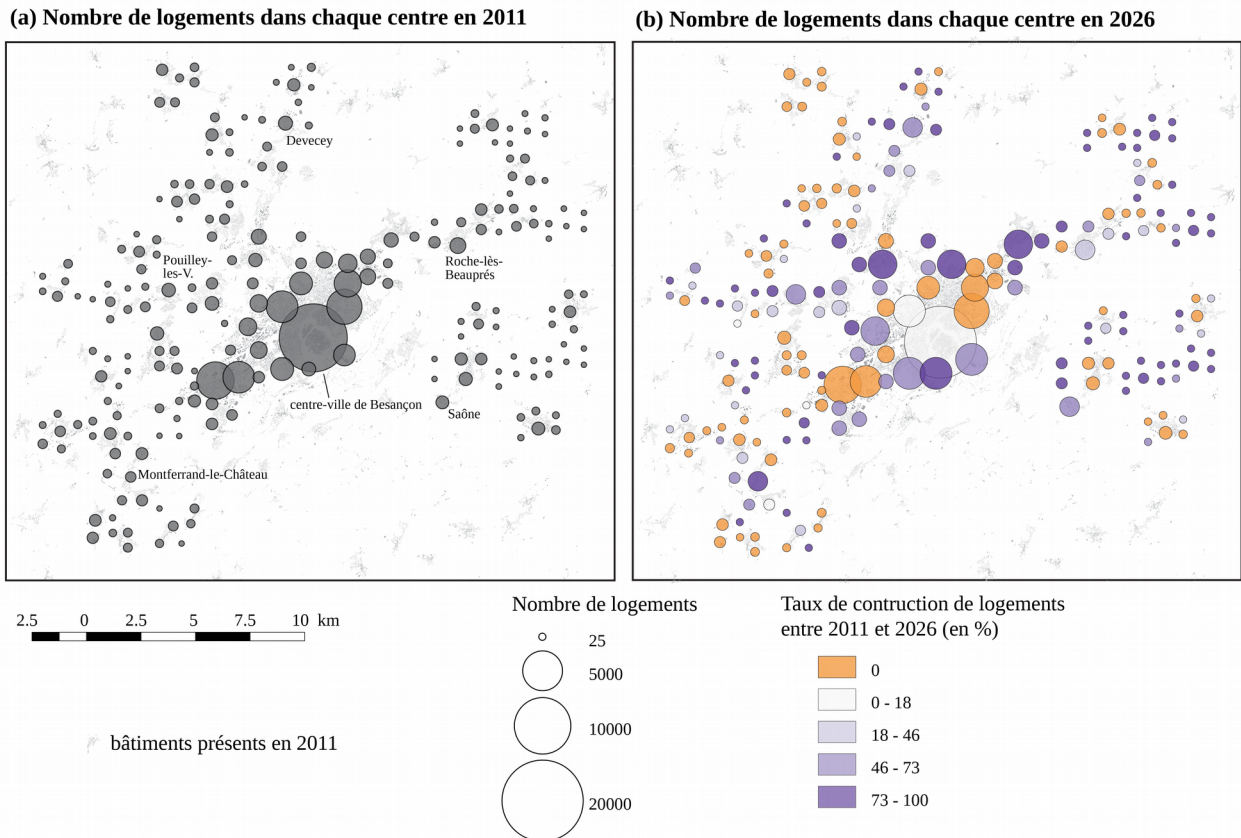


Finalement, le plan multifractal ainsi obtenu présente les caractéristiques suivantes : un développement axial le long des axes de transport en commun ; les centres de développement sont spatialement connexes exceptés dans une zone entre Besançon et Saône en raison de la présence de zones non urbanisables (zones de fortes pentes et zones naturelles protégées) ; les espaces à

l'extérieur des centres de développement sont également connexes, ce qui permet d'éviter la fragmentation des espaces verts et naturels ; de larges secteurs dans lesquels aucun développement n'est prévu (qui sont, actuellement ou potentiellement, des espaces verts et naturels) pénètrent dans l'agglomération, depuis l'extérieur de celle-ci jusqu'au centre-ville de Besançon.

Concernant le développement résidentiel, le nombre de total de logements à construire entre 2011 et 2026 a été fixé d'après les orientations du SCoT et du PLH. Il est de 16 800 logements. Ensuite, nous avons défini un principe de répartition de la croissance résidentielle, c'est-à-dire choisi où faire porter la croissance de manière à modifier la distribution rang-taille (en termes de logements, donc de population) des centres dans un sens qu'on estimerait souhaitable. Premièrement, nous avons considéré qu'aucun logement ne devait être construit hors des centres planifiés d'autant qu'en 2011, un grand nombre de logements étaient déjà situés en dehors des centres. Les paramètres α , β , et γ ont été choisis à cet effet, voir Tableau 4 dans (Frankhauser, Tannier, Vuidel, Houot *sous presse*). Deuxièmement, nous avons souhaité faire porter la croissance résidentielle surtout sur les centres du deuxième niveau fonctionnel situés dans la première couronne autour de Besançon (code 011, cf. Figure 71) et les centres du troisième niveau fonctionnel situés dans la première couronne périurbaine (code 110, cf. Figure 71). Les valeurs des paramètres a , b , et c ont été choisies adéquatement, voir Tableau 5 dans (Frankhauser, Tannier, Vuidel, Houot *sous presse*). Avec ces valeurs de paramètres, la hiérarchie des centres de peuplement est davantage accentuée en 2026 qu'en 2011 (Figure 77, page suivante), bien que les centres de couleur orange contiennent plus de logements que recommandé par le modèle.

Figure 77. Un plan multifractal de développement de l'agglomération de Besançon (Est de la France) : nombre de logements dans chaque centre en 2011 et en 2026.



La conception de ce plan de développement multifractal pour l'agglomération de Besançon représentait un défi car la zone d'étude est soumise à des nombreuses contraintes naturelles et réglementaires (d'où l'étendue importante des zones non urbanisables) et sa configuration spatiale initiale (en 2011) était loin d'être multifractale. En outre, la croissance résidentielle prévue d'ici 2026 était de faible ampleur, ce qui empêchait une modification importante de la configuration spatiale de la zone d'étude. Quoi qu'il en soit, grâce à Fractalopolis, il a été possible de proposer une transformation réaliste et modérée de l'agglomération de Besançon qui respecte les cinq principes d'aménagement exposés en début de cette section 3.2 du mémoire et qui font s'approcher la région d'une configuration multifractale. Cette entreprise illustre le fait qu'une modélisation multifractale du développement urbain peut être appliquée à une zone d'étude quelconque, en tenant compte de l'existant.

De nombreux autres plans multifractals pour l'agglomération de Besançon pourraient être imaginés, notamment en réponse à des modifications des paramètres du modèle de distribution spatiale des logements à construire, des modifications de l'IFS, d'autres objectifs en matière d'accessibilité aux services, ou encore l'ajout de contraintes d'aménagement supplémentaires. Via l'application de Fractalopolis sur l'agglomération de Besançon, on comprend intuitivement qu'il n'existe pas une seule et unique "bonne" hiérarchie du système de peuplement. *« At this stage of the research we cannot determine whether the existence of a primate [built] cluster is favorable or not, or if a city shape similar to a Hybrid Fractal Carpet is better than another city shape »* (Tannier & Thomas 2013). Cependant, l'accentuation de la hiérarchie initiale ou son infléchissement dans un sens ou dans un autre peut être intéressante. On peut par exemple fixer un objectif de réduction de la primatie de la distribution rang-taille (en nombre de logements) des agrégats bâtis afin de la faire tendre vers une distribution invariante d'échelles.

« (...) l'essentiel d'une bonne planification urbaine n'est-elle pas de maintenir une bonne adaptabilité des tissus urbains à des conditions ultérieures que nul ne peut prévoir ? A-t-on bien mesuré la souplesse d'adaptation des structures fractales ? » (Pumain 2017). A cette question, il est possible de répondre que l'application de Fractalopolis sur l'agglomération de Besançon illustre une certaine forme d'adaptabilité d'un modèle fractal de développement urbain : la localisation, le nombre et les caractéristiques des différents centres (et donc les distances qui les séparent, y compris les possibilités de déplacement offertes par la présence de stations de transports en commun) peuvent être définis en fonction des spécificités de chaque zone d'étude, en son état actuel et, possiblement, futur. Il serait aussi possible d'appliquer Fractalopolis pour l'aménagement de *shrinking cities* : Fractalopolis aiderait à déterminer les centres dans lesquels un certain nombre de logements devraient être détruits et, éventuellement, remplacés par des espaces verts ou agricoles.

« L'espace urbain relationnel n'est pas que celui, quotidien, de la vie urbaine habitante, il est aussi celui des multiples interactions par lesquelles les enjeux de la ville prennent leur valeur dans des réseaux externes d'amplitude plus vaste » (Pumain 2017). Cette remarque incite à réfléchir à l'extension de Fractalopolis à la modélisation de systèmes de villes, par exemple, via l'introduction de modèles de répartition de la population et des différents types d'activités qui seraient basés sur une logique d'interaction spatiale. Si une application à l'échelle d'un système de villes est possible alors le couplage avec des applications aux échelles locales pourrait aider à intégrer les réflexions d'aménagement qui sont faites à l'échelle des grandes régions françaises (par exemple, Bourgogne Franche-Comté) et celles menées au niveau local (par exemple, au sein des agglomérations de Dijon et de Besançon).

4. Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons montré que les propriétés d'invariance d'échelles et d'auto-similarité statistique de la distribution spatiale des implantations humaines sont localement spécifiques et non universelles. En effet, les invariances d'échelles ou auto-similarités identifiées à partir d'analyses de données empiriques sont circonscrites spatialement et concernent des intervalles d'échelles limités. Ceci ne remet toutefois pas en cause l'intérêt d'utiliser des modèles basés sur l'hypothèse d'invariance d'échelles ou d'auto-similarité pour analyser et simuler la distribution spatiale des implantations humaines.

D'autres réflexions menées dans ce chapitre aboutissent à contredire l'idée qu'une distribution spatiale invariante d'échelles ou auto-similaire représenterait un optimum absolu. D'une part, une forme ne peut être optimale en soi. Elle ne l'est que par rapport aux processus (i. e. aux modes de fonctionnement) qu'elle permet d'optimiser. Or on connaît encore (très) mal l'effet de distributions spatiales invariantes d'échelles sur des processus géographiques dont l'existence est reconnue empiriquement. D'autre part, l'absolu n'existe pas en termes de distribution spatiale des implantations humaines en raison de la diversité des contextes sociaux, politiques, économiques, naturels, etc. desquels résultent des fonctionnements des hommes dans l'espace également très divers. Par conséquent, il paraît impossible de définir des solutions d'aménagement, notamment sous la forme de normes chiffrées (par exemple, un seuil absolu définissant une distance acceptable à la station de transports en commun la plus proche ou une valeur d'exposant d'une loi de puissance), qui puissent être appliquées avec succès en tout lieu. C'est pourquoi MUP-City et Fractalopolis ne comportent aucune règle qui détermine à quel point on doit concentrer ou disperser (les bâtiments, les logements, les commerces et services) à chaque niveau d'analyse. Ils servent uniquement à définir et à respecter un certain nombre de contraintes, via un modèle général qui doit être paramétré pour chaque situation spécifique. De ceci résulte une certaine concentration des implantations humaines à différentes échelles.

A travers ce troisième chapitre du mémoire, nous avons donc apporté quelques éléments de réponse aux trois questions fondamentales de la géographie énoncées dans l'introduction du chapitre 1 et que nous rappelons ici.

- 1) *L'espace est-il différencié ?* Pour répondre à cette question, on s'attache à identifier et caractériser des différenciations spatiales.
- 2) *Pourquoi est-il différencié ?* On recherche des explications à ces différenciations.
- 3) *Pourquoi observe-t-on cette différenciation là et pas une autre ?* On s'efforce de distinguer à quel point les explications à ces différenciations sont générales, valables pour différents espaces et/ou différentes périodes dans le temps, ou bien singulières et relevant de spécificités locales.

Ce troisième chapitre illustre aussi le fait que, pour qu'un modèle soit utile à l'amélioration de la connaissance de la distribution spatiale des implantations humaines ou à leur aménagement (c'est-à-dire qu'il contribue au domaine empirique), ses fondements théoriques doivent être clairs, notamment car ceux-ci contribuent à l'interprétation des résultats du modèle. Ceci nous ramène à l'introduction du chapitre 2 du mémoire dans laquelle on établit que les ontologies du domaine du modèle, du domaine empirique et du domaine conceptuel doivent être décrites explicitement afin s'assurer la cohérence entre des hypothèses thématiques et un modèle formalisé.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons présenté et illustré les applications possibles de plusieurs modèles géographiques différents : dans le chapitre 1, une grille générique d'observation des dynamiques de concentration et de dispersion des implantations humaines à différentes échelles ; dans le chapitre 2, trois modèles de simulation multi-agents (MobiSim-DR, MobiSim-MR et SimFeodal) ; dans le chapitre 3, trois modèles d'analyse fractale (la Geographically Weighted Fractal Analysis (GWFA), le spectre multifractal et MorphoLim) et deux modèles de simulation fractale (MUP-City et Fractalopolis). Notre principal objectif a été de mettre en évidence les apports et les limites de chaque modèle pour la caractérisation des formes de concentration et de dispersion des implantations humaines et pour la compréhension des processus à l'origine de ces formes.

Pour R. Golledge (2002), la création de connaissance en géographie a évolué, vers le milieu du XX^{ème} siècle, d'un intérêt porté aux localisations (inventorier les lieux et les caractériser) à un intérêt porté à la compréhension des relations complexes entre l'homme et son environnement, tant physique que social, culturel, politique et cognitif.

« In the latter part of this [20th] century there has been a change from inventory dominated activity to the creation of knowledge generated by emphasizing cognitive demands, such as understanding “why” and “how” in addition to “what” and “where.” This has required a change from an emphasis on form to an emphasis on process » (Golledge 2002).

Dans cette conclusion du mémoire, nous suggérons que le tournant du début du XXI^{ème} siècle est peut-être celui d'intégrer pleinement la modélisation des formes et celles des processus. Ceci est rendu possible par l'utilisation courante, depuis le milieu des années 90, de la géomatique (basée sur des modèles de données à référence spatiale), de la simulation multi-agents (avec laquelle les modèles sont, de fait, spatialement explicites) ainsi que de l'analyse et de la modélisation fractale (qui permet de représenter explicitement des dépendances d'échelles spatiales). Ces innovations, tant méthodologiques que techniques, ont permis de concevoir de nouveaux modèles desquels ont résulté des avancées autant théoriques (relevant du domaine conceptuel) que thématiques (relevant du domaine empirique).

En géographie, cette dialectique entre les outils et les méthodes, d'une part, et la démarche et les résultats scientifiques, d'autre part, avait déjà été soulignée, il y a maintenant 30 ans, par M. Le Berre (1987) : *« Les contraintes des outils méthodologiques que j'ai utilisés ont eu le mérite de m'imposer plus de rigueur dans mes raisonnements ; elles m'ont fait découvrir de nouveaux questionnements qui m'ont ouvert de nouvelles pistes de recherche ; elles m'ont forcée à une confrontation dialectique constante entre mes préoccupations sur l'objet de la géographie et les méthodologies à mettre en œuvre pour expliquer le comportement des organisations spatiales ».*

Du point de vue de la démarche scientifique, ce mémoire illustre à quel point la prise en compte conjointe et explicite des trois domaines (domaine conceptuel, domaine du modèle, domaine empirique), recommandée par P. Livet, D. Phan, J.-C. Müller et L. Sanders (2010), est utile pour concevoir des modèles qui contribuent à faire avancer la connaissance géographique de la

concentration et de la dispersion des implantations humaines. Le modèle est vu comme une interface entre les domaines théoriques et empiriques.

Au-delà, mais ceci n'a pas été abordé dans ce mémoire, un modèle géographique peut être conçu et utilisé comme un instrument de médiation avec le monde réel. Tel est le cas quand le modèle est mis en œuvre pour des opérations concrètes d'aménagement urbain et régional et qu'il est un instrument de médiation entre les scientifiques et les praticiens de l'aménagement¹. Tel est aussi le cas quand le modèle est conçu dans un cadre scientifique interdisciplinaire et qu'il est un instrument de médiation entre les différentes disciplines impliquées².

Géographie théorique, théories géographiques

En économie, les chercheurs s'inscrivent majoritairement dans un courant dominant et contribuent chacun à valider ou à consolider la théorie de ce courant et ses modèles. Prenons l'exemple du modèle urbain monocentrique de W. Alonso (1964). Ce modèle, comme celui de E. Burgess (1925), représente une croissance urbaine sous la forme d'anneaux concentriques de rente foncière décroissante du centre de la ville vers la périphérie. Les individus, pour choisir leur lieu de résidence, opèrent un arbitrage entre la proximité au centre (où se concentrent les emplois) et la superficie dont ils peuvent disposer, sous contrainte budgétaire. En introduisant dans le modèle une différenciation des individus selon une seule variable, le revenu, qui est considéré comme un facteur individuel de choix (les individus ont les mêmes préférences et les mêmes fonctions de coûts de transports), la répartition des individus au sein de la ville suit la règle des cercles concentriques de telle sorte qu'en allant du centre vers la périphérie, les classes de consommateurs sont rangées par ordre croissant de revenu (Fujita & Thisse 2002). En économie urbaine, ce modèle urbain monocentrique d'Alonso, consolidé par deux économistes E. Mills (1967) et R. Muth (1969), constitue un socle théorique sur lequel un vaste ensemble de travaux s'est développé, sous la forme d'applications, d'extensions et de modifications du modèle initial.

G. Duranton et A. Rodríguez-Pose (2005) ont assimilé la manière dont la connaissance se construit en géographie économique au mode de vie des papillons, et la manière dont la connaissance se construit en économie géographique au mode de vie des lions. Leur comparaison se distingue des rapports de domination entre économie et géographie évoqués par A. Amin et N. Thrift (2000). Ils appuient leur comparaison sur le fait que les papillons ont un mode de vie individualiste et butinent à leur gré une fleur après une autre tandis que les lions vivent en groupes socialement organisés et que chaque lion doit franchir successivement et dans l'ordre différentes étapes, depuis le stade de lionceau pour atteindre celui de chef de groupe³.

Nous souhaitons proposer ici une autre lecture de la construction de modèles en géographie en partant du constat que nombre de géographes, la plupart sûrement, ont tenté d'intégrer le contenant

1 Voir par exemple l'expérimentation avec le service Urbanisme de la Ville de Besançon décrite dans (Tannier, Hirtzel *et al.* 2016).

2 Une illustration en est donnée, à partir de l'exemple du modèle SimFeodal, dans la thèse de R. Cura en cours de réalisation au laboratoire Géographie-cités (Paris).

3 « *Far from portraying the economic geographer as the amateurish trainer who valiantly, but foolishly, tries in vain to tame a pride of wild lions only to end up devoured by the beasts, our own experience suggested a very different picture: that of two disciplines ignoring each other. Our perception was that geographers had long lost their interest in lions despite the fact that the lions were performing some remarkable variations of their original tricks and had left the circus altogether in search for more appealing and exciting performers. Whereas the economists/lions were busy steadily improving and expanding their tricks, geographers had become butterflies, freely flying the fields of knowledge with the aim of tasting the best from every flower they visit* » (Duranton & Rodríguez-Pose 2005).

spatial et le contenu social des lieux. Ils se sont donc intéressés aux processus à l'œuvre dans les sociétés humaines qui sont à l'origine des formes de concentrations et de dispersion des implantations humaines (cf. la citation de R. Golledge (2002) au début de cette introduction). Ces processus ne sont pas les mêmes que les processus régissant la création de la rente foncière en économie, ni ceux déterminant le mouvement des corps ou des particules en physiques, ni ceux présidant au fonctionnement ou à l'évolution de systèmes biologiques. Sur cette base, ont été conçus des modèles qui sont proprement géographiques et non des déclinaisons (éventuellement simplistes) de modèles physiques ou biologiques.

Ainsi, les trois principes qui sont énoncés dans le chapitre 1 (section 1.1) de ce mémoire (minimisation de l'énergie utilisée pour les échanges et les déplacements, concurrence, complémentarité) sont reliés les uns aux autres et intégrés dans quelques modèles théoriques géographiques. On peut d'abord citer trois modèles fondateurs, celui d'organisation radio-concentrique des cultures autour d'un centre de J. von Thünen (1826), celui de croissance de la ville d'E. Burgess (1925) sous la forme d'un ajout progressif d'anneaux concentriques de rente foncière décroissante du centre de la ville vers la périphérie, et celui des places centrales de W. Christaller (1933). Ensuite, le modèle gravitaire dont l'exposé du principe remonte au XIX^{ème} siècle (Ravenstein 1885) et dont les bases ont été posées par J. Stewart (1942, 1948), a fait l'objet de très nombreux travaux d'application et d'améliorations successives (Commenges 2016). Ce modèle, et plus largement tous les modèles d'interaction spatiale, représentent pour la géographie des migrations et des transports un socle théorique aussi important que l'est le modèle d'Alonso pour l'économie spatiale urbaine. Enfin, le modèle de diffusion d'une innovation de T. Hägerstrand (1952, 1967) intègre de manière exemplaire les trois principes pré-cités.

Comme la réalité empirique contredit ces modèles ou bien qu'il apparaît toujours des faits observés que ces modèles théoriques ne prévoient pas, les géographes ont le plus souvent tenté de concevoir de nouveaux modèles plutôt que de modifier ou de généraliser les modèles existants. C'est en partie grâce à la multiplicité des modèles pré-existants, qu'il est maintenant possible de concevoir des modèles géographiques intégrateurs, c'est-à-dire associant le contenant spatial et le contenu social des lieux et tenant compte des trois principes et des cinq lois énoncés dans le chapitre 1.

Peut-être est-ce le pendant de la multiplicité des modèles, il n'existe pas de théories en géographie comparables à celles de la physique (par exemple, la théorie de la relativité) ou des mathématiques (par exemple, la théorie des ensembles), c'est-à-dire qu'il n'existe pas de formalisation théorique unificatrice. Cependant, nous avons montré dans ce mémoire qu'il est possible de concevoir des modèles tels que Fractalopolis, basés sur une formalisation mathématique davantage intégrée (incluant le principe de dépendance d'échelles) et qui peuvent s'appliquer à des zones d'études spatialement différenciées grâce à une transcription sous forme informatique. Dès lors, on peut imaginer que la théorie explicative de la croissance des villes proposée par D. Pumain (1997, 2012)⁴, qui articule les processus observés aux niveaux intra-urbains et ceux observés au niveau des systèmes de villes, et qui donc est unificatrice, pourrait être dans un futur proche transcrite formellement via l'utilisation combinée de formalisations mathématiques et informatiques. Ce travail, qui a d'ores et déjà été amorcé (Schmitt, Rey-Coyrehourcq, Reuillon, Pumain 2015), pourrait bénéficier de certaines représentations du domaine conceptuel et du domaine du modèle qui ont été proposées dans ce mémoire.

4 Voir aussi (Pumain, Paulus, Vacchiani-Marcuzzo, Lobo 2006).

Références bibliographiques

A

- Aguilera A. (2005). Growth in commuting distances in French polycentric metropolitan areas: Paris, Lyon, Marseille. *Urban studies*, 42(9), pp. 1537-1547.
- Aguilera F., Valenzuela L.M., Botequilha-Leitão A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99, pp. 226-238.
- Akerlof G. (1997). Social distance and social decisions. *Econometrica*, 65(5), pp. 1005-1027.
- Alberti M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28, pp. 168-192.
- Alperovich G. (1984). The size distribution of cities: on the empirical validity of the rank-size rule. *Journal of Urban Economics*, 16(2), pp. 232-249.
- Alonso W. (1964). *Location and Land Use*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- Amblard F., Bommel P., Rouchier J. (2007). Assessment and validation of multi-agent models. In D. Phan, F. Amblard (eds) *Agent-based modelling and simulation in the social and human science*, Bardwell Press, Oxford, pp. 93-114.
- Amblard F., Rouchier J., Bommel P. (2006). Evaluation et validation des modèles multi-agents. In F. Amblard, D. Phan (eds) *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermès Science Publication, Paris, pp. 103-140.
- Amin A., Thrift N. (2000). What kind of economic theory for what kind of economic geography? *Antipode*, 32(1), 2000, pp. 4-9.
- Andersson C. (2008). Ontogeny and ontology in complex systems modeling. In S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano, A. Vancheri (eds) *The Dynamics of Complex Urban Systems: An Interdisciplinary Approach*, Physica-Verlag Heidelberg, New York, pp. 43-58.
- Angold P. G., Sadler J. P., Hill M. O., Pullin A., Rushton S., Austin K., Small E., Wood B., Wadsworth R., Sanderson R., Thompson K. (2006). Biodiversity in urban habitat patches. *Science of the Total Environment*, 360, pp. 196-204.
- Antoni J.-P., Lunardi N., Vuidel G. (2016). Simuler les mobilités individuelles. Les enjeux de l'information géographique. *Revue Internationale de Géomatique*, 2, pp. 237-262.
- Appleby S. (1996). Multifractal Characterization of the Distribution Pattern of the Human Population. *Geographical Analysis*, 28(2), pp. 147-160.
- Arbia G., Benedetti R., Espa G. (1996). Effects of the MAUP on image classification. *Geographical Systems*, 3, pp. 123-41.
- Ariza-Villaverde A., Jiménez-Hornero F. J., Guitérrez de Ravé E. (2013). Multifractal analysis of axial maps applied to the study of urban morphology. *Computers, Environment and Urban Systems*, 38, pp. 1-10.

- Arcaute E., Hatna E., Ferguson P., Youn H., Johansson A., Batty M. (2015). Constructing cities, deconstructing scaling laws. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(102) : 20140745, pp. 1-8.
- Arlinghaus S. L. (1985). Fractals Take a Central Place. *Geografiska Annaler, Series B, Human Geography*, 67(2), pp. 83-88.
- Arlinghaus S. L. (1987). *Essays on Mathematical Geography II*. Ann Arbor, MI: Institute of Mathematical Geography, Monographs Series.
- Arlinghaus S. L., Nystuen J. D. (1990). Geometry of Boundary Exchanges. *Geographical Review*, 80(1), pp. 21-31.
- Auerbach F. (1913). Das Gesetz der Bevölkerungskonzentration. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 59, pp. 74-76.
- Axelrod R. (1997). *The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration*. Princeton University Press.

B

- Bailly A. (1996). La ville, espace vécu. In P. Derycke, J. Huriot, D. Pumain (dir) *Penser la ville*, Anthropos, collection Villes, Paris, pp. 163-172.
- Bailly E. (1996). Position de recherche sur une méthode de détermination d'un contour urbain. *Cybergeog: European Journal of Geography*, 10 [En ligne].
- Bairoch P. (1985). *De Jéricho à Mexico*. Gallimard, Paris.
- Baldock K.C.R., Goddard M.A., Hicks D.M., Kunin W.E., Mitschunas N., Osgathorpe L.M., Potts S.G., Robertson K.M., Scott A.V., Stone G.N., Vaughan I.P., Memmott J. (2015). Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects. *Proceedings of the Royal Society B (Biological Sciences)*, 282: 20142849.
- Banos A. (2013). *Modéliser c'est apprendre. Itinéraire d'un géographe*. Editions Matériologiques, Collection "Modélisations, simulations, systèmes complexes", Paris.
- Banos A., Sanders L. (2013). Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie (Chap. 31). In F. Varenne, M. Silberstein (dir) *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation (Tome 1)*, Éditions Matériologiques, Collection Sciences & Philosophie, pp. 833-863.
- Barnsley M. (1988). *Fractals Everywhere*. Academic Press, New York.
- Barros J. (2012). Exploring urban dynamics in Latin American cities using an agent-based simulation approach. In A. Heppenstall, A. Crooks, L. See, M. Batty (eds) *Agent-based models of geographical systems*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 571–589.
- Batty M., Longley P. A. (1986). The Fractal Simulation of Urban Structure. *Environment and Planning A*, 18, pp. 1143-1179.
- Batty M., Longley, P. A. (1987). Urban shapes as fractals. *Area*, 19(3), pp. 215-221.
- Batty M., Kim K. (1992). Form follows function: reformulating urban population density function, *Urban Studies*, 29, pp. 1043-1070.
- Batty M., Longley, P. A. (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Academic Press, San Diego (CA) and London.

- Batty M., Xie Y. (1999). Self-Organized Criticality and Urban Development. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 3, pp. 109-124.
- Batty M., Xie Y. (1996). Preliminary Evidence for a Theory of the Fractal City. *Environment and Planning A*, 28, pp. 1745-1762.
- Batty M. (2013). A theory of city size. *Science*, 340, pp. 1418-1419.
- Baveye P., Boast C. W. (1998). Fractal geometry, fragmentation processes and the physics of scale invariance: an introduction. In P. Baveye, J.-Y. Parlange, B. A Stewart. (eds) *Fractals in soil science*, CRC Press, Taylor & Francis, pp. 1-54.
- Ben-Akiva M., de Palma A. (1986). Analysis of a dynamic residential location choice model with transaction costs. *Journal of Regional Science*, 26(2), pp. 321–341.
- Benenson I. (1998). Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Computers, Environment and Urban Systems*, 22(1), pp. 25–42.
- Benenson I., Omer I., Hatna E. (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29(4), pp. 491–512.
- Benguigui L., Czamanski D., Marinov M., Portugali Y. (2000). When and Where Is a City Fractal? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27, pp. 507-519.
- Benguigui L., Czamanski D. (2004). Simulation Analysis of the Fractality of Cities. *Geographical Analysis*, 36(1), pp. 69-84.
- Benguigui L., Blumenfeld-Lieberthal E. (2006). From lognormal distribution to power law: a new classification of the size distributions. *International Journal of Modern Physics C*, 17(10), pp. 1429–1436.
- Benguigui L., Blumenfeld-Lieberthal E., Czamanski D. (2006). The Dynamics of the Tel Aviv Morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33, pp. 269-284.
- Benguigui L., Blumenfeld-Lieberthal E. (2011). The end of a paradigm: is Zipf's law universal? *Journal of Geographical Systems*, 13, pp. 87-100.
- Berque A. (2003). 'Lieu' 1, *EspacesTemps.net*, Books, 19.03.2003, 2003, en ligne : <http://www.espacestems.net/en/articles/lieu-def1/>
- Bettencourt L. M. A., Lobo J., Helbing D., Kühnert C., West G. B. (2007). Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(17), pp. 7301-7306.
- Bettencourt L. M. A. (2013). The Origins of Scaling in Cities. *Science*, 340, pp. 1438-1441.
- Blau P. M. (1977a). *Inequality and heterogeneity*. New York, Free Press.
- Blau P. M. (1977b). A macro sociological theory of social structure. *American Journal of Sociology*, 83(1), pp. 26-54.
- Boudon R. (1967). *L'analyse mathématique des faits sociaux*. Paris, Plon.
- Bouligand G. (1929). Sur la notion d'ordre de mesure d'un ensemble plan. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, II-53, pp. 185-192.
- Bourgeois M. (2015). *Impacts écologiques des formes d'urbanisation. Modélisations urbaines et paysagères*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.

- Bouzouina L. (2008). *Ségrégation spatiale et dynamiques métropolitaines*. Thèse de doctorat en économie, Université Lumière Lyon 2, Faculté des sciences économiques et de gestion.
- Brasebin M. (2014). *Les données géographiques 3D pour simuler l'impact de la réglementation urbaine sur la morphologie du bâti*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paris-Est.
- Bretagnolle A. (1996). Étude des indices de concentration d'une population. *L'Espace Géographique*, 25(2), pp. 145-157.
- Bretagnolle A. (2005). Les villes dans l'espace-temps : vitesse des communications et structuration des territoires à l'échelle intra et interurbaine. In A. Volvey (dir) *Echelles et temporalités*, Atlante, Clefs Concours : géographie thématique, pp.180-187.
- Bretagnolle A., Paulus F., Pumain D. (2002). Time and space scales for measuring urban growth, *Cybergeo: European Journal of Geography*, 219 [En ligne].
- Bretagnolle A., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C. (2007). Les formes des systèmes de villes dans le monde. In M.-F. Mattei, D. Pumain (dir) *Données urbaines 5*, Anthropos-Economica, coll. Villes, pp. 301-314.
- Brunet R. (1989). L'aveuglante unité de la géographie, *L'Espace géographique*, vol. XVIII, n°2 « La géographie et ses enseignements », pp. 94-101.
- Brunsdon C., Fotheringham A. S., Charlton M. (1996). Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity. *Geographical Analysis*, 28(4), pp. 281-298.
- Burgess E. W. (1925). The growth of the city. An introduction to a research project. In R. E. Park, E. W. Burgess (eds) *The city*. 47. Chicago University Press.

C

- Cariboni J., Gatelli D., Liska R., Saltelli A. (2007). The role of sensitivity analysis in ecological modelling. *Ecological Modelling*, 203(1-2), pp. 167-182.
- Cavailhès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I. (2004). Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of a fractal metropolitan area. *Environment and Planning A*, 36(8), pp. 1471-1498.
- Cavailhès J., Frankhauser P., Peeters D., Thomas I. (2010). Residential equilibrium in a multifractal metropolitan area. *The Annals of Regional Science*, 45(3), pp. 681-704.
- Chhabra A., Jensen R. (1989). Direct Determination of the $f(\alpha)$ Singularity Spectrum. *Physical Review Letters*, 62, pp. 1327-1330.
- Chen Y. (2009). A new model of urban population density indicating latent fractal structure. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 1, pp. 89-110.
- Chen Y. (2011). Derivation of the functional relations between fractal dimension of and shape indices of urban form. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, pp. 442-451.
- Chen Y. (2014). Urban chaos and replacement dynamics in nature and society. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 413, pp. 373-384
- Chen Y. (2016). Defining urban and rural regions by multifractal spectrums of urbanization. *Fractals*, 24(1): 1650004.
- Chen Y., Wang J. (2013). Multifractal Characterization of Urban Form and Growth: The Case of Beijing. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(5), pp. 884-904.

- Chen Y., Zhou Y. (2004). Multi-Fractal Measures of City-Size Distributions Based on the Three-Parameter Zipf Model. *Chaos, Solitons and Fractals*, 22(4), pp. 793-805.
- Christaller W. (1933). *Die zentralen Orte in Süddeutschland. Eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmäßigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischer Funktion*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1980 (Reprint d. Ausg. Jena 1933).
- Clark W. (1986). Residential segregation in American cities: A review and interpretation. *Population Research and Policy Review*, 5, pp 95-129.
- Collinge S. K. (1996). Ecological consequences of habitat fragmentation: Implications for landscape architecture and planning. *Landscape and Urban Planning*, 36(1), pp. 59-77.
- Colomb M., Brasebin M., Perret J., Tannier C. (2017). Simulation of a realistic residential development with the integration of two existing models. *European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, York, United Kingdom, 7-11 September 2017.
- Commenges H. (2016). Modèle de radiation et modèle gravitaire : du formalisme à l'usage. *Revue Internationale de Géomatique*, 26(1), pp. 79-95.
- Conway T. (2009). Local environmental impacts of alternative forms of residential development. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, pp. 927-943.
- Cooper J., Oskrochi R. (2008). Fractal analysis of street vistas—a potential tool for assessing levels of visual variety in everyday street scenes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35, pp. 349-363.
- Corominas-Murtra B., Solé R. V. (2010). Universality for Zip's Law. *Physical Review E*, 82(1), 011102.
- Cottineau C., Hatna E., Arcaute E., Batty M. (2017). Diverse cities or the systematic paradox of Urban Scaling Laws. *Computers, Environment and Urban Systems*, 63, pp. 80-94.
- Crosetto M., Tarantola S., Saltelli A. (2000). Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 81(1), pp. 71–79.
- Cura R., Cottineau C., Swerts E., Ignazzi C., Bretagnolle A., Vacchiani-Marcuzzo C., Pumain D. (In press). The Old and the New: Qualifying City Systems in the World with Classical Models and New Data. *Geographical Analysis*.
- Cura R., Tannier C., Leturcq S., Zadora-Rio E., Lorans E., Rodier X. (sous presse). Transition 8 : 800-1100. Fixation, polarisation et hiérarchisation de l'habitat rural en Europe du Nord-Ouest (chap. 11), In : L. Sanders (dir.) *Transitions dans les systèmes de peuplement : observer, interpréter et simuler l'émergence du changement spatial*, Presses universitaires François Rabelais, Tours, pp.
- Czamanski D., Benenson I., Malkinson D., Marinov M., Roth R., Wittenberg L. (2008). Urban sprawl and ecosystems—can nature survive? *International Review of Environmental and Resource Economics*, 2, pp. 321-366.

D

- D'Arcy Thompson W. (1917, ré-édition de 1971). *On Growth and Form*. Abridged Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Davoudi S. (2003). Polycentricity in european spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*, 11(8), pp. 979-999.

- Deffuant G., Amblard F., Dubos R., Ramat E. (2003). Une démarche expérimentale pour la simulation individus-centrée. *Actes des 10èmes Journées de Rochebrune - Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels - Statut épistémologique de la simulation*, Rochebrune, pp. 45–64.
- De Keersmaecker M.-L., Frankhauser P., Thomas I. (2003). Using Fractal Dimensions for Characterizing Intra-Urban Diversity. The Example of Brussels. *Geographical Analysis*, 35(4), pp. 310-328.
- Devisch O., Timmermans H., Arentze T., Borgers A. (2006). Modelling residential search and location choice. In J. P. van Leeuwen, H. J. P. Timmermans (eds) *Progress in Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, 8th International DDSS Conference, 4-7 July 2006, Eindhoven University of Technology, pp. 185-200.
- Diamond J. (1997). *De l'inégalité parmi les sociétés - Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*. Paris, Gallimard, trad. française, 2000.
- Donnay J.-P. (1994). Agglomérations morphologiques et fonctionnelles, l'apport de la télédétection urbaine. *Acta Geographica Lovaniensia*, 34, pp. 191-199.
- Dubrulle B., Graner F., Sornette D. (1997). Foreword: Scale Invariance and Beyond. In B. Dubrulle, F. Graner, D. Sornette (eds) *Scale Invariance and Beyond (Les Houches Workshop, March 10–14, 1997)*, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, pp. 1-21.
- Durand-Dastès F. (1989). Sur un espace intellectuel. *L'Espace géographique*, XVIII(2) « La géographie et ses enseignements », pp. 86-89.
- Durand-Dastès F. (1991). Le particulier et le général. In F. Audigier, G. Baillat (dir), *Actes du 6e Colloque de Didactiques de l'histoire, de la géographie, des sciences sociales*, pp. 207-216.
- Durand-Dastès F. (2001a). Le temps, la géographie et ses modèles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 40(1), pp. 5-13.
- Durand-Dastès F. (2001b). Les concepts de la modélisation en analyse spatiale. In L. Sanders (dir) *Modèles en analyse spatiale*, Hermès Science Publications, Paris, pp. 31-60.
- Durand-Dastès F. (2014). Constitution des aires et différenciation spatiale. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 62, pp. 15-23.
- Duranton G., Rodríguez-Pose A. (2005). Guest editorial: When economists and geographers collide, or the tale of the lions and the butterflies. *Environment and Planning A*, 37, pp. 1695-1705.

E

- Eeckhout J. (2004). Gibrat's Law for All Cities. *The American Economic Review*, 94, pp. 1429-1451.
- Eeckhout J. (2009). Gibrat's Law for All Cities: A Reply. *The American Economic Review*, 99, pp. 1676-1683.
- Edmonds B., Moss S. (2005). From KISS to KIDS – An 'Anti-simplistic' Modelling Approach. In P. Davidsson, B. Logan, K. Takadama (eds) *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation. MABS 2004. Lecture Notes in Computer Science (book series)*, vol. 3415. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 130-144.

Encarnaç o S., Gaudiano M., Santo F. C., Tened rio J. A., Pacheco J. M. (2012). Fractal cartography of urban areas. *Scientific Reports*, 2(527), www.nature.com/scientificreports.

Epstein J. (2006). *Generative Social Science – Studies in Agent-Based Computational Modeling*, Princeton University Press.

F

Fahrig L. (1997). Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. *Journal of Wildlife Management*, 61, pp. 603-610.

Falconer K. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester (UK).

Favaro J.-M., Pumain D. (2011). Gibrat Revisited: An Urban Growth Model including Spatial Interaction and Innovation Cycles. *Geographical Analysis*, 43(3), pp. 261-286.

Feng J., Chen Y. (2010). Spatiotemporal evolution of urban form and land-use structure in Hangzhou, China: Evidence from fractals. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(5), pp. 838-856.

Foltête J.-C., Clauzel C., Vuidel G. (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling & Software*, 38, pp. 316-327.

Forman R. T. T. (1995). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. University Press, Cambridge.

Forman R. T. T., Alexander L. E. (1998). Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, pp. 207-231.

Fotheringham A. S., Batty M., Longley P. A. (1989). Diffusion-Limited Aggregation and the fractal nature of urban growth. *Papers of the Regional Science Association*, 67, pp. 55-69.

Fotheringham A. S., Charlton M. E., Brunson, C. (1998). Geographically Weighted Regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis. *Environment and Planning A*, 30(11), pp. 1905–1927.

Fotheringham A. S., Wong D.W.S. (1991). The Modifiable Areal Unit Problem in Multivariate Statistical Analysis. *Environment and Planning A*, 23(7), pp. 1025-1044.

François N., Frankhauser P., Pumain D. (1995). Villes, densité et fractalité. Nouvelles représentations de la répartition de la population. *Les Annales de la recherche urbaine*, 67 "Densités et espacements", pp. 55-64.

Frankhauser P. (1988). Fractal Aspects of Urban Systems. *Sonderforschungsbereich 230 "Natürliche Konstruktionen"*, 1, pp. 67-76.

Frankhauser P. (1990). Aspects fractals des structures urbaines. *L'Espace géographique*, 19-20(1), pp. 45-69.

Frankhauser P. (1994). *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos, Paris.

Frankhauser P. (1997). L'approche fractale. Un nouvel outil de réflexion dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines. *Population*, 4, pp. 1005-1040. Version anglaise : (1998). The fractal approach: a new tool for the spatial analysis of urban agglomerations. *Population*, 4, pp. 205-240.

Frankhauser P. (1998a). Fractals geometry of urban patterns and their morphogenesis. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2, pp. 127-145.

- Frankhauser P. (1998b). La formalisation fractale des tissus urbains. *Cahiers géographiques du Québec*, 42(117), pp. 379-398.
- Frankhauser P., Genre-Grandpierre C. (1998). La géométrie fractale - Un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, pp. 41-78.
- Frankhauser P. (dir.) (2003). *Morphologie des "villes émergentes" en Europe à travers les analyses fractales*, Rapport de recherche pour le Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Lettre de commande n°F0001 PUCA (Chef de projet : G. Dubois-Taine), 242 p.
- Frankhauser P. (2004). Comparing the morphology of urban patterns in Europe. A fractal approach. In A. Borsdorf, P. Zembri (eds) *European Cities: Insights on Outskirts, Structures*, ESF COST Office, Brussels, pp. 79-105.
- Frankhauser P. (2008). Fractal Geometry for Measuring and Modelling Urban Patterns. In S. Albeverio, D. Andrey, P. Giordano, A. Vancheri (eds) *The Dynamics of Complex Urban Systems*, Springer Physica Verlag, Heidelberg, pp. 213-243.
- Frankhauser P. (2015). From fractal urban pattern analysis to fractal urban planning concepts. In M. Helbich, J. J. Arsanjani, M. Leitner (eds) *Computational approaches for urban environments, geotechnologies and the environment*, Springer, pp. 13-48.
- Frankhauser P. (2017). Fractalité et fait urbain. De l'analyse des structures spatiales au concept d'aménagement. Conférence plénière, *Treizièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon, 17-19 mai 2017.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H. (2010). Une approche multi-échelle pour le développement résidentiel des nouveaux espaces urbains. In J.-P. Antoni (dir.) *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, Coll. Méthodes et approches, pp. 306-332.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G., Houot H. (in press). An integrated multifractal modelling to urban and regional planning. *Computers, Environment and Urban Systems*.
- Frémond M. (2015). *Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg. Évaluation par la simulation*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.
- Fujita M., Thisse J.F. (2002). *Economics of agglomeration. Cities, industrial location and regional growth*. Cambridge University Press.

G

- Gabaix X., Ibragimov R. (2011). Rank-1/2: A Simple Way to Improve the OLS Estimation of Tail Exponents. *Journal of Business and Economic Statistics*, 29(1), pp. 24-29.
- Galster G. (1988). Residential segregation in American cities: A contrary review. *Population Research and Policy Review*, 7, pp. 113-121.
- Galton A., Mizoguchi R. (2009). The water falls but the waterfall does not fall: new perspectives on objects, processes and events. *Applied Ontology*, vol. 4, n°2, pp. 71-107.
- Gan L., Li D., Song S. (2006). Is the Zipf law spurious in explaining city-size distributions? *Economics Letters*, 92, pp. 256-262.
- Gardin J.-C. (1979). *Une archéologie théorique*. Paris, Hachette.

- Genre-Grandpierre C. (2017). Commentaire sur le chapitre 1. In G. Dupuy (dir) *Villes, réseaux et transport. Le défi fractal*, Economica, Collection "Méthodes et approches", Paris, pp. 31-39.
- Geohagan J. (2002). The value of open spaces in residential land use. *Land Use Policy*, 19, pp. 91-98.
- Gibrat R. (1931). *Les inégalités économiques : applications aux inégalités des richesses, à la concentration des entreprises, aux populations des villes, aux statistiques des familles, etc., d'une loi nouvelle, la loi de l'effet proportionnel*. Paris, Sirey.
- Girardet X., Foltête J.-C., Clauzel C. (2013). Designing a graph-based approach to landscape ecological assessment of linear infrastructures. *Environmental Impact Assessment Review*, 42, pp. 10-17.
- Glaeser E. L., Scheinkman J. A. (2001). Chapter 4 Measuring social interactions. In S. N. Durlauf, H. P. Young (Eds) *Social dynamics*, Brookings Institution, pp. 83-131.
- Glaeser E. L. (2008). *The economic approach to cities*. Harvard Institute of Economic Research Discussion Paper n°2149.
- Golledge R., Amadeo D. (1968). On laws in geography. *Annals of the Association of American Geographers*, 58 (4), pp. 760-774.
- Golledge R. (2002). The Nature of Geographic Knowledge. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(1), pp. 1-14.
- Goodchild M. (1980). Fractals and the Accuracy of Geographical Measures. *Mathematical Geology*, 12(2), pp. 85-98.
- Goodchild M., Mark D. (1987). The Fractal Nature of Geographic Phenomena. *Annals of the Association of American Geographers*, 77(2), pp. 265-278.
- Goodchild M. (2016). *Laws in Geography*. Conférence au Collège International des Sciences du Territoire, December 2016, Paris.
- Grassberger P., Procaccia I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D*, 9, pp. 189-208.
- Grasland C. (2003). Richesse et population dans le monde : une représentation multiscalaire des inégalités. *Mappemonde*, 01/2003.
- Grasland C. (2009). Spatial Analysis of Social Facts. In F. Bavaud, C. Mager (dir) *Handbook of Theoretical and Quantitative Geography*, Lausanne, FGSE, pp. 117-174.
- Guérin-Pace F. (1995). Rank-Size Distribution and the Process of Urban Growth. *Urban Studies*, 323, pp. 551-562.
- Guérois M. (2003). *Les formes des villes européennes vues du ciel - Une contribution de l'image CORINE Land Cover à la comparaison morphologique des grandes villes d'Europe occidentale*. Thèse de géographie, Université de Paris I.
- Gurrutxaga M., Lozano P.J., Del Barrio G. (2010). Assessing highway permeability for the restoration of landscape connectivity between protected areas in the Basque Country, Northern Spain. *Landscape Research*, 35, pp. 529-550.

H

- Haag G. (1994). The Rank-Size Distribution of Settlements as a Dynamic Multifractal Phenomenon. *Chaos, Solitons and Fractals*, 4(4), pp. 519-534.
- Hägerstrand T. (1952). *The propagation of innovation waves*. Lund Studies in Geography: Series B, Human geography, 4, Royal University of Lund, Dept. of Geography.
- Hägerstrand T. (1957). Migration and area. In C. D. Hannerberg, T. Hägerstrand, B. Odeving *Migration in Sweden. A symposium*, Lund Studies in Geography: Series B, Human geography, 13, Royal University of Lund, Dept. of Geography, pp. 17–128.
- Hägerstrand T. (1967) [1953]. *Innovation diffusion as a spatial process [Innovationsförloppet ur korologisk synpunkt]*. Postscript and translation by Allan Pred; translated with the assistance of Greta Haag. University of Chicago Press, Chicago, USA.
- Haggett P. (1973). *L'analyse spatiale en géographie humaine*, Armand Colin, Paris. Traduction française de : Haggett P. (1965). *Locational Analysis in human geography*, Edward Arnold, London.
- Hamby D. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32, pp. 135–154.
- Hanski I. (2011). Habitat loss, the dynamics of biodiversity, and a perspective on conservation. *Ambio*, 40, pp. 248-255.
- Harman P. M. (ed.) (2009). *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell : 1846-1862*. Vol. 1, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Heppenstall A. J., Evans A. J., Birkin M. H. (2007). Genetic algorithm optimisation of an agent-based model for simulating a retail market. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 34, pp. 1051–1071.
- Hernando A., Hernando R., Plastino A., Zambrano E. (2014). Memory Endowed US Cities and Their Demographic Interactions. *Journal of the Royal Society Interface*, 12: 20141185.
- Hirtzel J. (2015). *Exploration prospective des mobilités résidentielles dans une agglomération urbaine au moyen d'un modèle de simulation multi-agents (MobiSim)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Franche-Comté.
- Houet T., Aguejdad R., Doukari O., Battaia G., Clarke K. (2016). Description and Validation of a “Non-path-dependent” Model for Projecting Contrasting Urban Growth Futures. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 759 [On line].
- Houot H., Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P. (2009). Multi-scale scenarios of urban residential development and accessibility to retail stores and facilities. 16th *European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, Maynooth-Ireland, 4-8 September 2009.
- Hotelling H. (1929). Stability in Competition. *The Economic Journal*, 39(153), pp. 41-57.
- Howard E. (1898). *To-morrow: A Peaceful Path to Real Reform*. Swan Sonnenschein & Co, London.

IJK

Kamps S. (2013). *Dual-agent simulation model of the residential development process - An institutional approach to explaining the spatial patterns of residential development in France, England and the Netherlands*. PhD thesis, University of Franche-Comté.

Kohler M., Tannier C., Blond N., Aguejdad R., Clappier A. (2017). Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study. *Urban Climate*, 19, pp. 92-121.

L

Lam N. (1990). Description and Measurement of Landsat TM Images Using Fractals. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(2), pp. 187-195.

Lam N., Quattrochi D. (1992). On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences. *Professional Geographer*, 44(1), 88–98.

Legay J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle – Un discours sur la méthode*, Collection Sciences en questions, INRA Éditions.

Lemoy R., Caruso G. (2017). *Scaling evidence of the homothetic nature of cities*. Working paper, arXiv:1704.06508v1 [physics.soc-ph].

Livet P. (2005). *Qu'est-ce qu'une action ?* Collection Chemins philosophiques, Vrin, Paris.

Livet P., Müller J.-P., Phan D., Sanders L. (2010). Ontology, as a mediator for agent-based modeling in social science. *Journal of Artificial societies and Social Simulation*, 13(1), 3.

Livet P., Phan D., Sanders L. (2014). Diversité et complémentarité des modèles multi-agents en sciences sociales. *Revue française de sociologie*, 55(4), pp. 689-729.

Longley P. A., Mesev V. (1997). Beyond the analogue models: space filling and density measurement of an urban settlement. *Papers in Regional Science*, 76(4), pp. 409-427.

Longley P. A., Mesev V. (2000). On the measurement and generalisation of urban form. *Environment and Planning A*, 32, pp. 473-488.

Louf R., Barthelemy M. (2014). Commentary. Scaling: lost in the smog. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41, pp. 767-769.

M

Madelin M., Grasland C., Mathian H., Sanders L., Vincent J.-M. (2009). Das „MAUP“: Modifiable Areal Unit –Problem oder Fortschritt? *Informationen zur Raumentwicklung*, Heft 10/11/2009, pp. 645-660.

Mandelbrot B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco.

Makse H. A., Andrade J. S., Batty M., Havlin S., Stanley H. E. (1998). Modeling urban growth patterns with correlated percolation. *Physical Review E*, 58(6), pp. 7054-7062.

Manski C. (2000). Economic analysis of social interactions. *The journal of economic perspectives*, 14(3), pp. 115-136.

- Marsden P.V., Friedkin N.E. (1994). Network studies of social influence. In S. Wasserman, J. Galaskiewicz (eds) *Advances in Social Network Analysis: Research in the Social and Behavioral Sciences*, Sage, Thousand Oaks, pp. 3-25.
- Marull J., Mallarach J. M. (2005). A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. *Landscape and Urban Planning*, 71, pp. 243-262.
- Mathian H., Piron M. (2001). Echelles géographiques et méthodes statistiques multi-dimensionnelles. In L. Sanders (dir) *Modèles en analyse spatiale*, Collection Traité IGAT, Série Aspects fondamentaux de l'analyse spatiale, Hermès-Lavoisier, Paris, pp. 62-103.
- Mathian H., Sanders L. (2014). *Objets géographiques et processus de changement. Approches spatio-temporelles*. Collection Systèmes d'information géographique, ISTE Edition, Surrey (Great Britain).
- Mathian H., Tannier C. (2015). Formalisation des interactions spatiales dans les modèles multi-agents : essai d'analyse comparative. *Revue internationale de géomatique*, 25(3), pp. 393-414.
- Mills E. S. (1967). Transportation and patterns of urban development. An Aggregative Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area. *Papers and Proceedings of the Seventy-ninth Annual Meeting of the American Economic Association*, 57(2), pp. 197-210.
- Minkowski H. (1903). Volumen und Oberfläche. *Mathematische Annalen*, 57, pp. 447-495.
- Minsky M. L. (1965). Matter, Mind and Models. *International Federation of Information Processing Congress 1965*, 1, pp. 45-49.
- Monod H., Naud C., Makowski D. (2006). Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. In D. Wallach, D. Makowski, J. W. Jones (eds) *Working with dynamic crop models: evaluating, analysing, parameterizing and using them*, Elsevier, Amsterdam, pp. 55–100.
- Moriconi-Ebrard F. (1993). *L'urbanisation du monde*. Paris, Anthropos-Economica.
- Muller J.-C. (1978). Map gridding and cartographic errors: a recurrent argument. *Canadian Cartographer*, 14, pp. 152-167.
- Muth R. F. (1969). *Cities and housing: the spatial pattern of urban residential land use*. University of Chicago Press.

N

- Nadal J.-P., Gordon M. B. (2005). Physique statistique de phénomènes collectifs en sciences économiques et sociales. *Mathématiques et sciences humaines*, 43(172), pp. 65-88.
- Ngo T. A., See L. M. (2012). Calibration and validation of agent-based models of land cover change. In A. Heppenstall, A. Crooks, L. See, M. Batty (eds) *Agent-based models of geographical systems*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 181–197.
- Niang M., Soboyejo W.O. (2006). On the Use of Quasi-crystal and Fractal Concepts in the Design of Affordable Rural/Urban Landscapes. *Perspectives on Global Development and Technology*, 5(4), pp. 411-421.
- Nordbeck S. (1971). Urban allometric growth. *Geografiska Annaler. Series B: Human Geography*, 53(1), pp. 54-67.

O

- Oliveira J.A., Balaban O., Doll C.N.H., Peñaranda R. M., Gasparatos A., Iossifova D., Suwa A. (2011). Cities and biodiversity: perspectives and governance challenges for implementing the convention on biological diversity (CBD) at the city level. *Biological Conservation*, 144, pp. 1302-1313.
- Onaka J. et Clark W. (1983). A disaggregate model of residential mobility and housing choice. *Geographical Analysis*, 15(4), pp. 287-304.
- Openshaw S. (1981). Le problème de l'agrégation spatiale en géographie. *L'Espace Géographique*, 10(1), pp. 15-24.
- Openshaw S. (1983). The Modifiable Areal Unit Problem. *Concepts and Techniques in Modern Geography*, n° 38, Geo Books, Norwich (Headley Brothers Ltd. Kent).
- Orain O. (2004). *La géographie française face à la notion d'échelle. Une approche par les significations et les contenus épistémologiques*. Cours dans le cadre de la question d'agrégation "Échelles et temporalités en géographie", fascicule II, CNED, Vanves, pp. 2-24.
- Orozco C.D.V., Golay J., Kanevski M. (2015). Multifractal Portrayal of the Swiss Population. *Cybergeog: European Journal of Geography*, 714 [On line].

P

- Páez A., Scott D.M., Volz E. (2008). A discrete-choice approach to modeling social influence on individual decision making. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35, pp. 1055-1069.
- Pareto V. (1896). La courbe de la répartition de la richesse. In *Recueil publié par la faculté de droit à l'occasion de l'exposition nationale suisse*, Genève, Université de Lausanne, pp. 373-387.
- Pavón-Domínguez P., Ariza-Villaverde A., Rincón-Casado A., Gutiérrez de Ravé E., Jiménez-Hornero F. J. (2017). Fractal and multifractal characterization of the scaling geometry of an urban bus-transport network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, pp. 229-238.
- Peeters D., Caruso G., Cavailhès J., Thomas I., Frankhauser P., Vuidel G. (2015). Emergence of leapfrogging from residential choice with endogenous green space: analytical results. *Journal of Regional Science*, 55(3), pp. 491-512.
- Pellegrini P., Fotheringham A. (2002). Modelling spatial choice: a review and synthesis in a migration context. *Progress in Human Geography*, 26(4), pp. 487-510.
- Phan D., Müller J.-P., Sibertin-Blanc C., Ferber J., Livet P. (2014). Introduction à la modélisation par SMA en SHS : comment fait-on une ontologie ? In D. Phan (ed) *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*, Hermès Lavoisier, Traité RTA Série Informatique et Systèmes d'Information, pp. 21-52.
- Philbrick A.K. (1957). Principles of areal functional organisation in regional human geography. *Economic Geography*, 33(4), pp. 229-336.
- Pinchemel P. (1989). Une liste de concepts. *L'Espace Géographique*, XVIII(2) « La géographie et ses enseignements », pp. 134-135.

- Plumejeaud C., Mathian H., Gensel J., Grasland C. (2011). Spatio-temporal analysis of territorial changes from a multi-scale perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(1), pp. 1597-1612.
- Proshansky H. M. (1978). The city and self-identity. *Environment and Behavior*, 10, pp. 147-170.
- Pumain D. (1997). Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace Géographique*, 26(2), pp. 119-134.
- Pumain D. (2006). Alternative Explanations of Hierarchical Differentiation in Urban Systems. In D. Pumain *Hierarchy in Natural and Social Sciences*, Methodos series 3, Springer, pp. 169-222.
- Pumain D., Paulus F., Vacchiani-Marcuzzo C., Lobo J. (2006). An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 343 [En ligne].
- Pumain D. (2007). Lois d'échelle et mesure des inégalités en géographie. *Revue européenne des sciences sociales*, XLV(138), pp. 55-65.
- Pumain D. (2010a). Commentaire : Transition fractal-non fractal et objets géographiques. *L'Espace Géographique*, 39(2), pp. 113-116.
- Pumain D. (2010b). Dynamique des entités géographiques et lois d'échelle dans les systèmes complexes : la question de l'ergodicité. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 191(3), pp. 5-18.
- Pumain D. (2012). Une théorie géographique pour la loi de Zipf. *Région et Développement*, 36, pp. 31-54.
- Pumain D. (2017). Commentaire sur le chapitre 3 - Les fractales doivent-elles guider l'aménagement urbain ? In G. Dupuy (dir) *Villes, réseaux et transport. Le défi fractal*, Economica, Collection "Méthodes et approches", Paris, pp. 113-119.

QR

- Quine W. van O. (2003). *Du point de vue logique. Neuf essais logico-philosophiques*. (1^{ère} éd. 1953), Paris, Vrin.
- Racine J.-B., Raffestin C., Ruffy V. (1980). Echelle et action, contributions à une interprétation du mécanisme de l'échelle dans la pratique de la géographie. *Geographica Helvetica*, 35(5), pp. 87-94.
- Ravenel L. (2003). Dossier pédagogique : la présence d'étrangers entraîne-t-elle le vote pour l'extrême droite, *Espace, populations, sociétés*, 3, pp. 541-547.
- Ravenstein G. E. (1885). The laws of migration. *Journal of the Statistical Society of London*, 48(2), pp. 167-235.
- Ravenstein G. E. (1889). The Laws of Migration: Second Paper, *Journal of the Royal Statistical Society*, 52, pp. 241-305.
- Reggiani A., Nijkamp P. (2015). Did Zipf anticipate spatial connectivity structures? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42, pp. 468-489.
- Rey A. (dir.) (2010). *Dictionnaire historique de la langue française - Article « Modèle »*, Le Robert.
- Reymond H. (1981). Pour une problématique théorique. In H. Isnard, J.-B. Racine, H. Reymond (dir) *Problématiques de la géographie*, PUF, Collection Le Géographe, Paris, pp. 163-262.
- Richiardi M., Leombruni R., Saam N., Sonnessa M. (2006). A common protocol for agent-based social simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(1) [On line].

Ricœur P. (1964). *Histoire et Vérité*. 2nde édition, Points, collection Essais, Paris.

Rozenblat C. (2010). Opening the Black Box of Agglomeration Economies for Measuring Cities' Competitiveness through International Firm Networks. *Urban Studies*, 47, pp. 2841-2865.

Rozenfeld H. D., Rybski D., Gabaix X., Makse H. A. (2011). The Area and Population of Cities: New Insights from a Different Perspective on Cities. *American Economic Review*, 101, pp. 2205–2225.

S

Saltelli A., Chan K., Scott E. (2000). *Sensitivity analysis*. John Wiley & Sons, New York.

Salingaros N., West B. (1999). A universal rule for the distribution of sizes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(6), pp. 909-923.

Sanders L. (2007). Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie. *Revue internationale de géomatique*, 17 « Dynamiques urbaines », pp. 135-160.

Sanders L. (2014). Un cadre conceptuel pour modéliser les grandes transitions des systèmes de peuplements de 70 000 BP à aujourd'hui. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 63, pp. 5-19.

Savard J.-P., Clergeau P., Mennechez G. (2000). Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, 48, pp. 131-142.

Say J.-B. (1803). *Traité d'économie politique, ou simple exposition de la manière dont se forment les richesses*. Paris (imprimerie de Crapelet).

Schaeffer F. (1953). Exceptionalism in Geography : A Methodological Examination. *Annals of the Association of American Geographers*, 43(3), pp. 226-249.

Schmitt C., Rey-Coyrehourcq S., Reuillon R., Pumain, D. (2015). Half a billion simulations: evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 42(2), pp. 300-315.

Schouten M., Verwaart T., Heijman W. (2014). Comparing two sensitivity analysis approaches for two scenarios with a spatially explicit rural agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 54, pp. 196–210.

Schwanen T., Dieleman F. M., Dijst M. (2001). Travel behaviour in Dutch monocentric and polycentric urban systems. *Journal of transport geography*, 9, pp. 173-186.

Schwanen T., Dijst M., Dieleman F. M. (2004). Policies for urban form and their impact on travel: the Netherlands experience. *Urban Studies*, 41(3), pp. 579-603.

Schweitzer F., Steinbrink J. (2002). Analysis and Computer Simulation of Urban Cluster Distributions. In K. Humpert, K. Brenner, S. Becker (eds) *Fundamental Principles of Urban Growth*, Müller + Busmann, Wuppertal (Germany), pp. 142-157.

Sémécurbe F., Tannier C., Roux S. (2016). Spatial distribution of human population in France: exploring the Modifiable Areal Unit Problem using multifractal analysis. *Geographical Analysis*, 48(3), pp. 292–313.

Sémécurbe F., Tannier C., Roux S. G. (submitted). Is the shape of the city determined by its surrounding settlements? An answer for French cities using a Geographically Weighted Fractal Analysis. *Journal of Geographical Systems*.

Shen G. (2002). Fractal Dimension and Fractal Growth of Urbanized Areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(5), pp. 437-519.

Soo K. (2005). Zipf's law for cities: a cross-country investigation. *Regional Science and Urban Economics*, 35, pp. 239-263.

Stamps A. E. (2002). Fractals, skylines, nature and beauty. *Landscape and Urban Planning*, 60(3), pp. 163-184.

Stewart J. Q. (1942). A measure of the influence of a population at a distance. *Sociometry*, 5(1), pp. 63-71.

Stewart J. Q. (1948). Demographic gravitation: evidence and applications. *Sociometry*, 11(1-2), pp. 31-58.

Sun Z., Lorscheid I., Millington J. D., Lauf S., Magliocca N. R., Groeneveld J., Balbi S., Nolzen H., Müller B., Schulze J., Buchmann C. M. (2016). Simple or complicated agent-based models? A complicated issue. *Environmental Modelling & Software*, 86, pp. 56-67.

T

Tajfel H., Turner J. C. (1986). The social identity theory of intergroup behavior. In S. Worchel, W.G. Austin (eds) *Psychology of intergroup relations*, Chicago, Nelson-Hall, pp. 7-24.

Tannier C., Bourgeois M., Houot H., Foltête J-C. (2016). Impact of urban developments on the functional connectivity of forested habitats: a joint contribution of advanced urban models and landscape graphs. *Land Use Policy*, 52, pp. 76-91.

Tannier C., Bourgeois M., Frémond M. (2017). Simulation de scénarios fractals d'urbanisation et des mobilités quotidiennes résultantes (chap. 5). In G. Dupuy (dir) *Villes, réseaux et transport. Le défi fractal*, Economica, Collection "Méthodes et approches", Paris, pp. 155-189.

Tannier C., Foltête J-C., Girardet X. (2012). Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats. *Landscape and Urban Planning*, 105(1-2), pp. 128-139.

Tannier C., Franc A., Ouriachi M.-J., Zadora-Rio E. (sous presse). Entre modèles et récits, les transitions dans les systèmes de peuplement (TransMonDyn) (chap. 14). In L. Sanders (dir) *Transitions dans les systèmes de peuplement : observer, interpréter et simuler l'émergence du changement spatial*, Presses universitaires François Rabelais, Tours, pp.

Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R., Couillet A., Vuidel G., Yousoufi S. (2016). Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. Feedback from an experimental trial in the city of Besançon. France. *Progress in Planning*, 108, pp. 1-38.

Tannier C., Morer M., Ansel D. (2012). La décision spatiale, entre choix individuels et références collectives (chap. 6). In P. Frankhauser, D. Ansel (dir) *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, Anthropos, Paris, pp. 147-174.

Tannier C., Pumain D. (2005). Fractals in Urban Geography: A Theoretical Outline and an Empirical Example. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 307 [En ligne].

Tannier C., Thomas I., Vuidel G., Frankhauser P. (2011). A fractal approach to identifying urban boundaries. *Geographical Analysis*, 43(2), pp. 211-227.

Tannier C., Thomas I. (2013). Defining and characterizing urban boundaries: A fractal analysis of theoretical cities and Belgian cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, pp. 234-248.

- Tannier C., Vuidel G., Frankhauser P., Houot H. (2010). Simulation fractale d'urbanisation - MUP-city, un modèle multi-échelle pour localiser de nouvelles implantations résidentielles. *Revue internationale de géomatique*, 20(3), pp. 303-329.
- Tannier C., Vuidel G., Houot H., Frankhauser P. (2012). Spatial accessibility to amenities in fractal and non fractal urban patterns. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 39(5), pp. 801-819.
- Tannier C., Zadora-Rio E., Leturcq S., Rodier X., Lorans E. (2014). Une ontologie pour décrire les transformations du système de peuplement européen entre 800 et 1100 (chap. 13). In D. Phan (dir) *Ontologies et modélisation par SMA en SHS*, Hermès-Lavoisier, Paris, pp. 289-310.
- Theiler J. (1990). Estimating fractal dimension. *Journal of the Optical Society of America Part A*, 7(6), pp. 1055-1073.
- Thom R. (1993). *Prédire n'est pas expliquer*, Flammarion, Paris.
- Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M. (2007). Fractal Dimension versus Density of the Built-up Surfaces in the Periphery of Brussels. *Papers in Regional Science*, 86(2), pp. 287-307.
- Thomas I., Frankhauser P., Biernacki C. (2008). The Morphology of Built-Up Landscapes in Wallonia (Belgium): A Classification Using Fractal Indices. *Landscape and Urban Planning*, 84, pp. 99-115.
- Thomas I., Frankhauser P., Frenay B., Verleysen M. (2010). Clustering patterns of urban built-up areas with curves of fractal scaling behaviour. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, pp. 942-954.
- Thomas I., Frankhauser P., Badariotti D. (2012). Comparing the fractality of European urban neighbourhoods: do national contexts matter? *Journal of Geographical Systems*, 14, pp. 189-208.
- Thomas I., Tannier C., Frankhauser P. (2008). Is there a link between fractal dimensions and other indicators of the built-up environment at a regional level. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 413 [On line].
- Tobler W. (1969). Geographical filters and their inverses. *Geographical Analysis*, 1(3), pp. 234-253.
- Tobler W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(2), pp. 234-240.
- Tobler W., Wineburg S. A. (1971). Cappadocian Speculation, *Nature*, 231(5297), pp. 39-41.
- Tobler W. (1979). Cellular geography, In S. Gale, G. Olsson (eds) *Philosophy in Geography*, Reidel, Dordrecht, pp. 379-386.
- Tobler W. (1990). Frame independent spatial analysis. In M. Goodchild, S. Gopal (eds) *Accuracy of spatial databases*, London: Taylor & Francis, pp. 115-222.
- Tobler W. (1995). Migration: Ravenstein, Thornthwaite, and beyond. *Urban Geography*, 16(4), pp. 327-343.
- Tobler W. (2004). On the First Law of Geography: A Reply, *Annals of the Association of American Geographers*, 94(2), pp. 304-310.
- Toger M., Malkinson D., Benenson I., Czamanski D. (2016). The connectivity of Haifa urban open space network. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(5), pp. 848-870.

Twigger-Ross C., Uzzel D. (1996). Place and identity process. *Journal of environmental psychology*, 16, pp. 205-220.

UV

Ullman E. L. (1954). Geography as spatial interaction. *Interregional Linkages (Proceedings of the Western Committee on Regional Economic Analysis)*, Berkeley, p. 63-71 (chap. 1, Boyce ed., 1979).

Vandermotten C., Roelandts M. G., Halbert L., Cornut P. (2008). European planning and the polycentric consensus: Wishful thinking? *Regional Studies*, 42(08), pp. 1205–1217.

Van Hecke E., Halleux J.-M., Decroly J.-M., Mérenne-Schoumacker B. (2009). *Noyaux d'habitat et Régions urbaines dans une Belgique urbanisée*, Brussels SPF Economy, Monograph n°9, 205 p.

Varenne F. (2010). Les simulations computationnelles dans les sciences sociales. *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 52, pp.17-49.

Varenne F. (2016). La sous-détermination des modèles explicatifs par les lois empiriques : un problème récurrent mais fécond en géographie de modélisation. In C. Blanckaert, J. Léon, D. Samain (dir) *Modélisations et sciences humaines – Figurer, interpréter, simuler*, L'Harmattan, Paris, pp. 85-102.

Varenne F. (2017). *Théories et modèles en sciences humaines. Le cas de la géographie*. Éditions Matériologiques, Collection "Modélisations, simulations, systèmes complexes", Paris.

Vicsek T., (1990). Mass multifractals. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 168(1), pp. 490-497.

Vidal de la Blache P. (1913). Des caractères distinctifs de la géographie. *Annales de Géographie*, 124(22), pp. 289-299.

van Vliet J., White R., Dragicevic S. (2009). Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33, pp. 35-43.

Vogt C.A., Marans R.W. (2004). Natural resources and open space in the residential decision process: a study of recent movers to fringe counties in Southeast Michigan. *Landscape and Urban Planning*, 69, pp. 255-269.

von Thünen J. H. (1826). *Der isolierte Staatt in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*. Hamburg.

Vyn R. J. (2012). Examining for Evidence of the Leapfrog Effect in the Context of Strict Agricultural Zoning. *Land Economics*, 88(3), pp. 457-477.

W

Weber C. (2001). Urban Agglomeration Delimitation Using Remote Sensing." In J.-P. Donnay, M. Barnsley, P. Longley (eds) *Remote Sensing and Urban Analysis*, Taylor & Francis, London, pp. 145-159.

Weidlich W. (2000-2006). *Sociodynamics: a systematic approach to mathematical modelling in the social sciences*. Re-publication by Dover Publications, New York, Series: Dover Books on Mathematics, Mineola.

Wendt H., Abry P., Roux S. G., Jaffard S., Vedel B. (2009). Analyse multifractale d'image : l'apport des coefficients dominants. *Traitement du Signal*, 26(1), pp. 47-65.

West G. B. (1988). Scale and Dimension - From Animals to Quarks. In N. G. Cooper, G. B. West (eds) *Particle Physics. A Los Alamos Primer*, Cambridge University Press, New York, pp. 2-11.

White R., Engelen G. (1993). Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. *Environment and Planning A*, 25(8), pp. 1175-1199.

White R., Engelen G. (1994). Urban Systems Dynamics and Cellular Automata: Fractal Structures between Order and Chaos. *Chaos, Solitons and Fractals*, 4(4), pp. 563-583.

White R., Luo W., Hatna E. (2001). Fractal Structures in Land Use Patterns of European Cities: form and Process, *12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, Saint-Valéry-en-Caux, France, 11 p.

White R. (2005). Modelling multi-scale processes in a cellular automata framework. In J. Portugali (ed.) *Complex Artificial Environments - Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 165–177.

XYZ

Zadora-Rio E. (dir) (2008). Des paroisses de Touraine aux communes d'Indre-et-Loire : la formation des territoires. *Revue Archéologique du Centre de la France*, 34^{ème} Supplément, éd. par FERACF.

Zellner M. L. (2008). Embracing complexity and uncertainty: the potential of agent-based modeling for environmental planning and policy. *Planning Theory and Practice*, 9(4), pp. 437–457.

Zipf G. K., (2012 - 1949), *Human Behavior and the Principle of the Least Effort – An Introduction to Human Ecology*, Mansfield, Martino Publishing (reprinted edition). Edition originale : Cambridge (Massachusetts), Addison-Wesley Press, 1949.