



**HAL**  
open science

# La théorie des jeux pour la modélisation et la simulation de l'émergence et de la dynamique des systèmes de villes

Mickaël Ferri

## ► To cite this version:

Mickaël Ferri. La théorie des jeux pour la modélisation et la simulation de l'émergence et de la dynamique des systèmes de villes. Histoire. Université d'Avignon, 2021. Français. NNT : 2021AVIG1218 . tel-04079569

**HAL Id: tel-04079569**

**<https://theses.hal.science/tel-04079569v1>**

Submitted on 24 Apr 2023

**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.



## THÈSE DE DOCTORAT D'AVIGNON UNIVERSITÉ

École Doctorale  
ED 537 "Culture & Patrimoine"

Discipline : Géographie

Laboratoire : UMR 7300 ESPACE

Présentée par  
Mickaël Ferri

---

# LOGIQUES DES INTERACTIONS SPATIALES, ÉMERGENCE ET DYNAMIQUE DES SYSTÈMES DE VILLES DANS LE TEMPS LONG

## *Approche par la modélisation Multi-Agents*

---

Soutenue publiquement le 22/01/2021 devant le jury composé de :

Mme Céline Vacchiani-Marcuzzo, Maître de Conférences-HDR, Université de Reims Champagne-Ardenne **Rapporteure**

M Éric Daudé, Directeur de Recherche CNRS, Normandie Université **Rapporteur**

Mme Alexandra Schaffar, Professeur, Université de Toulon **Examinatrice**

M Giovanni Fusco, Directeur de Recherche CNRS, Université Côte d'Azur **Examineur**

M Cyrille Genre-Grandpierre, Professeur, Avignon Université **Directeur de thèse**

Mme Tania Jimenez, Ingénieur de Recherche, Avignon Université **Co-directrice de thèse**

M Mounir Redjimi, Maître de Conférences, Avignon Université **Invité**





## Résumé

La récurrence d'une structure hiérarchique dans les systèmes de villes à travers le monde, caractérisée par le fait que les villes sont d'autant plus nombreuses qu'elles sont petites, et plus précisément qu'il existe globalement une relation entre la taille des villes et leur rang (la taille de la ville de rang  $r$  est égale à la population de la plus grosse ville divisée par  $r$ ) est un phénomène décrit depuis de nombreuses années. Cette régularité statistique, connue sous le nom de loi rang taille, ses variations locales et la recherche de ses explications ont largement été explorées par les géographes depuis plus d'un siècle. Assurément, les économies d'agglomération, qui favorisent la survenue de l'innovation, les modalités de sa diffusion dans la hiérarchie urbaine, elles-mêmes conditionnées par les réseaux de transport dont dépendent les interactions entre villes, jouent un rôle déterminant pour comprendre l'émergence et le maintien de systèmes de villes hiérarchisés.

Pour autant, si une nécessaire théorie sur l'évolution des systèmes de villes, qui regroupent à présent plus de la moitié de la population mondiale, est déjà bien avancée, il n'en demeure pas moins qu'il reste impossible de considérer un système de peuplement au temps  $t$  et d'en prévoir en détail l'évolution à un horizon donné, en particulier l'émergence de nouvelles concentrations de population, car les systèmes de villes sont à la fois compliqués et complexes.

Les gigantesques progrès de l'informatique ont permis, depuis une quarantaine d'années, de développer des modèles de simulation qui permettent de tester différentes hypothèses quant à l'évolution des systèmes de villes et ainsi mieux comprendre leur dynamique. C'est plus particulièrement le cas de la simulation Multi-Agents, mobilisée notamment par l'équipe P.A.R.I.S, qui a permis de grands progrès dans la compréhension de la dynamique des systèmes de villes en rendant possible le test d'hypothèses théoriques, parfois anciennes, concernant notamment la diffusion de l'innovation et ses impacts sur les systèmes de villes. Pour autant, ces modèles, très riches, présentent l'inconvénient de reposer sur de très nombreux paramètres et hypothèses, ce qui les rend difficiles à calibrer et rend leurs résultats parfois difficiles à interpréter. Par ailleurs, si ces modèles permettent d'analyser l'évolution d'un système de villes donné, l'émergence de nouvelles villes demeure assez peu abordée.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de contribuer, par la simulation Multi-Agents, à la recherche d'explications de l'émergence et du maintien de systèmes de villes hiérarchisés. Plutôt que de chercher à complexifier encore les modèles existants pour que leurs résultats correspondent le plus possible aux réalités empiriques, le parti pris de ce travail a été de poser une hypothèse centrale, « simple », sans dimension économique et qui s'oppose en cela aux approches les plus fréquentes, et d'en tester la validité. Cette hypothèse consiste à affirmer que la croissance allométrique des systèmes de villes est avant tout fonction de la façon dont s'effectuent les interactions entre villes à l'échelle individuelle. Plus précisément, il s'agit donc de voir dans un premier temps si, selon qu'un individu habitant une ville A choisi de déménager dans une ville B tirée au hasard, ou dont l'attractivité dépendra de l'historique en termes d'échange, de sa centralité et de son accessibilité, on parvient, ou pas, à générer des systèmes de villes hiérarchisés de type rang taille. Cela revient à vouloir confirmer que, bien avant des considérations économiques (profil économique des villes par exemple), ce sont avant tout les modalités de l'interaction spatiale qui président à l'évolution des systèmes de villes.

Dans un deuxième temps, toujours en plaçant l'interaction spatiale entre les individus au cœur de notre travail, nous chercherons à mieux comprendre l'émergence des villes, en étudiant dans quelle mesure ces lieux d'émergence peuvent correspondre à des concentrations spatio-temporelles d'échanges fructueux entre des individus en mouvement.

## Mot-clés

Système de Villes ; Réseau de Transport ; Coévolution ; Hiérarchie urbaine ; Émergence ville ; Modélisation ; Système Multi-Agents.

## Summary

The recurrence of a hierarchical structure in the systems of cities around the world, characterized by the fact that the cities are all the more numerous that they are small, and more precisely that it exist a relation between the size of the cities and their ranks (the size of a city of rank “ $r$ ” is equal to the population of the biggest city divided by “ $r$ ”) is a phenomenon which has been described for many years.

This statistical regularity, known as the rank size law, its local variations and the research for its explanations, have been widely explored by geographers for more than a century. Certainly, the agglomeration economies, favorizing innovation, its broadcast in urban hierarchy, themselves conditioned by transport networks of which interactions between cities depend, play a crucial role to understand emerging and maintenance systems of hierarchized cities.

However, if a necessary theory on the evolution of systems of cities, which regroup now more than half the world population, is already pretty well advanced, it is still impossible to consider a system of settlement at time “ $t$ ” and to predict in detail the evolution, especially the emergence of new population concentration, because systems of cities are complex.

The computer science’s gigantic progresses have been able, since about forty years, to develop simulation models, which can test different hypothesis regarding the evolution of the systems of cities and to better understand their dynamic. It is more especially the case of the Multi-Agent model, created by the P.A.R.I.S team, who allowed huge progresses in understanding the dynamic of systems of cities, allowing the theoretical hypothesis test, some old, concerning in particular the innovation diffusion and its impacts on the city system. However, those models, very documented and well used, are presenting the disadvantage to be based on numerous parameters and hypothesis, which makes it difficult to calibrate and render their results sometimes difficult to interpret. Also, if these models allow us to analyze the evolution of a systems of cities, the emergence of new cities is not well studied.

In this context, the goal of this thesis is to contribute, using the Multi-Agents simulation, to the research of explanations of the emergence and the maintenance of hierarchized systems of cities. Rather than looking to complexify more the existing models so that their results match the best possible to the empiric realities, it has been decided here to put down a central hypothesis, “simple”, without an economic dimension and which counteract with the most frequent approaches, and to test their validity. This hypothesis state that the allometric growth of the systems of cities is first a function of the way that the interactions between the cities happen at the individual scale. More precisely, it is necessary to look first if, depending if a person living in city A decide to move to the city B, draw at random, or of which the attractiveness’ will depend on its historical past in terms of trade, centrality, accessibility, can one succeed, or not, to generate systems of hierarchized cities type rank size. That is to tend to confirm that, way before economic considerations (economic profile of cities per example), it is before everything the spatial interaction modalities which preside on the evolution of systems of cities.

Secondly, always placing the spatial interaction between the individuals at the heart of our work, we are looking to better understand the emergence of the cities, by studying in which capacity these places of emergence could match spatio-temporal concentration of successful trade between people in movement.

## Keywords

Systems of Cities; Transport Networks; Coevolution; Urban hierarchy; City Emergence; Modelisation; Multi-Agent model.

## Table des matières

### Table des matières

Introduction.....	11
1 Explorer les logiques d'interactions spatiales à l'échelle individuelle pour comprendre l'émergence et la croissance allométrique des systèmes de villes.....	17
1.1 Villes et système de villes : des potentiels d'interactions.....	17
1.2 Les systèmes de villes : des systèmes complexes.....	19
1.2.1 Une brève définition de l'interaction spatiale.....	19
1.2.2 Les logiques des interactions spatiales dans les systèmes de villes.....	20
1.2.3 Les systèmes de villes.....	22
1.2.3.1 Des systèmes complexes .....	22
1.2.3.2 ... et adaptatifs.....	23
1.3 La hiérarchie, principal trait générique des systèmes de villes.....	25
1.4 Le nécessaire recours à la modélisation pour aborder les systèmes de villes.....	27
1.5 État de l'art sur l'émergence et l'évolution des systèmes de villes.....	29
1.5.1 Les théories de la croissance aléatoire.....	30
1.5.2 Les théories de la croissance déterministe.....	31
1.5.3 Les modèles dynamiques basés sur la modélisation Multi-Agents.....	33
1.5.3.1 Les systèmes Multi-Agents.....	33
1.5.3.2 Les SMA pour étudier l'émergence et la croissance des systèmes de villes.....	34
1.5.4 Tour d'horizon des modèles dynamiques d'évolution des systèmes de villes.....	34
1.5.5 Catégorisation des modèles dynamiques d'évolution des systèmes de villes basés sur la modélisation Multi-Agents.....	38
1.5.6 Limites des modèles dynamiques des systèmes de villes.....	40
1.5.6.1 Des modèles dynamiques de systèmes de villes aux hypothèses et paramètres (trop) nombreux ?.....	41
1.5.6.2 Pour une approche individu-centrée.....	41
1.5.6.3 La question de l'émergence des villes.....	42
1.6 Positionnement de notre recherche.....	42
1.6.1 Logiques des interactions et hiérarchie des systèmes de villes.....	43
1.6.2 Émergence des villes.....	44
2 Quelles logiques pour les interactions dans les systèmes de villes pour quelle croissance allométrique ?.....	49
2.1 Des logiques « a-spatiales » d'interaction permettent-elles de produire des systèmes de villes hiérarchisés ?.....	49
2.1.1 Choix aléatoire des destinations : le modèle aléatoire.....	50
2.1.2 Diagramme UML du modèle aléatoire.....	51

2.1.3	La destination des flux est choisie en fonction de la contribution des villes aux échanges : modèle contribution.....	52
2.1.4	Diagramme UML du modèle contribution.....	54
2.1.5	Plan d'expérience.....	55
2.1.6	Le choix de « R » comme plateforme de modélisation.....	57
2.1.7	Comparaison des hiérarchies simulées avec les hiérarchies théoriques.....	57
2.1.8	La hiérarchie : une structure stable.....	63
2.1.9	La position hiérarchique est fonction de l'échange.....	65
2.1.10	Constats et conclusions sur les impacts de logiques a-spatiales d'interactions sur la hiérarchie des systèmes de villes.....	68
2.2	Intégrer la friction de l'espace dans la logique des interactions permet-il de produire des systèmes hiérarchisés de villes de type rang-taille ?.....	69
2.2.1	Réseaux de transport et systèmes de villes.....	69
2.2.2	Un modèle Netlogo pour appréhender les interactions réseau de transport - systèmes de villes.....	69
2.2.3	Diagramme UML du modèle d'interaction spatiale.....	71
2.2.4	Plan d'expérience.....	72
2.2.4.1	Tester différentes répartitions spatiales des villes.....	73
2.2.4.2	Tester l'influence de la structure des réseaux de transport.....	73
2.2.4.3	Tester l'influence du type de distance considéré : graphe non-valué et graphe valué.....	78
2.2.5	Toujours pas de rang-taille.....	81
2.2.6	La centralité et l'accessibilité expliquent-elles la population des villes et leur rang ? .....	85
2.2.6.1	Définition des mesures.....	85
2.2.6.2	Corrélation entre centralité, accessibilité et rang hiérarchique : aucun indicateur n'explique seul la position des villes.....	87
2.2.7	Simuler l'interaction sur un réseau créé selon une logique d'efficacité territoriale : le réseau « Proximité-Contribution » ou « P-C ».....	91
2.3	La hiérarchie urbaine est-elle soumise à la <i>path dependency</i> ?.....	94
2.3.1	Conséquence d'une modification de la structure du réseau en cours de simulation...	95
2.3.2	Conséquences d'une augmentation des vitesses.....	98
2.3.2.1	Modification des vitesses globales.....	98
2.3.2.2	Améliorer les relations entre les petites villes pour lisser la hiérarchie urbaine : le modèle « rocade ».....	103
2.3.3	L'impact de la « fusion » entre deux systèmes de villes ayant évolué séparément...	106
2.3.4	Conclusion sur la <i>path dependency</i> .....	111
2.4	Tester le modèle sur des données historiques.....	111
2.4.1	Construction du modèle.....	112
2.4.2	De la hiérarchie, mais pas de rang-taille.....	115
2.4.3	Une répartition spatiale vraisemblable.....	119
2.5	Conclusion.....	122

3 Contribution à la compréhension de l'émergence des villes et de ses conséquences statistiques et spatiales sur le système de villes.....	125
3.1 Les concentrations spatio-temporelles d'échanges fructueux entre des individus en mouvement comme lieu d'émergence des villes.....	127
3.2 Présentation du modèle « Émergence ».....	128
3.2.1 Fonctionnement général du modèle « Émergence ».....	129
3.2.2 Les différents modes d'interaction entre agents Marchands.....	136
3.2.3 Émergence de nouveaux arcs après l'émergence des villes.....	136
3.3 Le plan d'expérience.....	137
3.3.1 Plateforme utilisée.....	141
3.4 Résultats.....	141
3.4.1 L'intensité de l'émergence des nouvelles villes est dépendante des conditions de l'interaction.....	141
3.4.2 Le nombre de nouvelles villes est influencé par le mode d'interaction entre les agents Marchands.....	144
3.4.3 Les topologies de réseau modélisées n'offrent pas les mêmes potentiels d'émergence.....	144
3.4.4 Conséquence de l'évolution de la topologie des réseaux sur la dynamique d'émergence.....	145
3.4.5 La convergence des distributions hiérarchiques vers une structure unique.....	146
3.4.5.1 Une convergence des distributions <i>hiérarchiques</i> des villes vers un modèle unique.....	147
3.4.5.2 Les villes émergentes restent majoritairement modestes.....	155
3.4.6 La compréhension de la dynamique spatio-temporelle de l'émergence des villes comme élément de compréhension de l'uniformisation des structures hiérarchiques.....	159
3.4.6.1 Une relative concentration des villes émergentes.....	160
3.4.6.2 Les effets de l'émergence sur les villes initiales.....	161
3.4.6.3 Une typologie des villes selon leur logique d'émergence.....	163
3.4.6.4 Une dynamique d'émergence influencée par le réseau de transport.....	169
3.5 Tester le modèle « Émergence » sur des données historiques.....	172
3.6 Résultats des simulations géo-historiques.....	174
3.6.1 Répartition spatiale des nouvelles villes.....	174
3.6.2 Hiérarchie.....	179
3.7 Conclusion modèle « Émergence ».....	184
Conclusion.....	187
Annexes.....	193
Annexe A : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance topologique.....	194
Annexe B : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance-temps.....	198

Annexe C : Comparaison aux modèles théoriques (modélisation sans émergence de villes)	202
Annexe D : Localisation hiérarchique des villes émergentes.....	203
Annexe E : Nombre de villes émergentes dans le « top 5 ».....	207
Annexe F : Comparaison globale des potentiels d'interactions entre villes initiales et villes émergentes.....	208
Bibliographie.....	211
Index des Illustrations.....	221
Index des tableaux.....	225

## Remerciement

Je tiens à remercier Madame Céline Vacchiani-Marcuzzo, et Monsieur Éric Daudé d'avoir accepté de lire, évaluer, rapporter et examiner ce travail de thèse. Je tiens également à remercier Madame Alexandra Schaffar et Monsieur Giovanni Fusco de faire partie du jury et d'accepter d'évaluer ce travail.

Je remercie le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le laboratoire ESPACE (UMR 7300) et l'Université d'Avignon.

Je remercie mes directeurs et encadrants Cyrille Genre-Grandpierre (pour son encadrement, sa très GRANDE patience et les nombreuses heures qu'il m'a accordé), Tania Jimenez (pour ses conseils, son expertise et sa bienveillance) et Mounir Redjimi (pour ses idées, lui qui me suit depuis le Master).

Je remercie l'équipe de l'UMR ESPACE 7300 (Avignon), les doctorants et tous ceux qui sont passés par la 2E13, ainsi que les PARs ; notamment Nathalie Brachet, Mathieu Coulon et Anthony Dalle pour leur aide technique tout au long de cette thèse.

Je remercie de Laboratoire Informatique d'Avignon (LIA) pour leur accueil et le support technique aux simulations qu'ils ont pu m'apporter par l'intermédiaire de leur serveur de calcul. De fait, je remercie Monsieur Vincent Labatut pour ses conseils sur *igraph*.

Merci aussi à Marine, Marco, Christine, Vezzo.

À Cyrielle et ma famille.



## Introduction

Depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle, plus de la moitié de la population mondiale vit en ville (Véron, 2007), que l'on peut définir dans un premier temps de façon fruste comme un « groupement permanent d'une population relativement importante en un même lieu » (Pumain *et al.* 2006). Cette proportion s'accroît continuellement, que l'on définisse la ville du point de vue morphologique, comme une continuité de bâti, ou d'un point de vue fonctionnel, comme un espace polarisé par un noyau urbain, cette polarisation s'exprimant par exemple par l'intensité des navettes domicile-travail (Robic, 1982). Avec cette augmentation continue, mais par à-coups, de la population urbaine (la révolution néolithique et la révolution industrielle ayant été notamment des temps forts particulièrement notables, Bairoch, 1985), on peut se demander si l'urbanisation constitue « l'horizon de l'humanité » (Lussault, 2010). Partout ou presque, la ville triomphe (Glaeser, 2012). Elle est perçue le plus souvent, et sait parfois être, le lieu de la liberté, de la création, de l'innovation, de la richesse, le lieu de tous les possibles. Mais elle est aussi parfois le lieu des inégalités les plus criantes, le lieu où la pression de l'homme sur l'environnement s'exerce avec le plus d'intensité, le lieu de la violence, de la surveillance, etc.

Pour les géographes qui visent à comprendre comment une société s'organise dans son rapport avec le spatial, en cherchant les régularités dans ces rapports entre les sociétés et leurs espaces, l'objet ville qui existe depuis plus de 3000 ans, qui évolue et s'adapte aux changements techniques et sociologiques et qui constitue la forme de peuplement majoritaire dans le monde, ne peut être qu'un objet central de la discipline. S'intéresser aux villes, c'est tout d'abord s'intéresser à la ville elle-même comme regroupement localisé de population dans l'espace. C'est en comprendre les logiques d'émergence, d'organisation et de fonctionnement. Pourquoi les hommes s'agglomèrent-ils en un lieu précis, quand on leur prêche au contraire individuellement des envies d'espacement, la possibilité de jouir du « luxe de l'espace » ? Comment s'organisent et fonctionnent ces formes qui peuvent être gigantesques jusqu'à regrouper plus de 30 millions d'individus ? Quelles sont les logiques qui organisent la compétition pour les places entre les différents types d'activités (se loger, travailler, se recréer, se déplacer) et les différentes catégories d'individus, qu'ils soient qualifiés par leur statut familial, leur âge ou leur revenu, etc. ? Quelles sont les caractéristiques des villes actuelles : plus ou moins denses, vertes, connectées, etc., pour quels types d'externalités : économiques (pourquoi une ville est-elle économiquement productive (Prud'homme, Lee, 1999)), sociétales (pourquoi les degrés de ségrégation socio-spatiale sont-ils variables (Schelling, 1971)), ou encore environnementales (pourquoi certaines villes exercent une pression plus forte sur leur environnement que d'autres ?). Dans la forme et le fonctionnement des villes tels qu'on les observe, quelle est la place des hommes, de l'effectivité de leurs aspirations à aménager leur territoire, à l'optimiser ? Les villes sont-elles sur le moyen – long terme des créations pensées, planifiées ou des formes auto-organisées nées des innombrables décisions individuelles ou collectives prises les unes à la suite des autres ? (Pumain, 1998). Toutes ces questions se posent à l'échelle de la ville elle-même, à l'échelle du « territoire de fréquentation quotidienne » (Pumain, 1997) qui correspond globalement à des déplacements des individus de l'ordre d'une heure par jour. En effet, comme l'ont relevé Zahavi et Talvitie (Zahavi, Talvitie, 1980), puis bien d'autres après eux (Levinson, Kumar, 1997 ; Crozet, Joly, 2004), le temps de transport quotidien demeure globalement stable entre une heure et une heure trente, quelles que soient les périodes et les localisations. C'est dans cet espace accessible à chacun en 1h-1h30, dont l'extension dépend donc de la vitesse des déplacements, que s'organisent les territoires urbains, la compétition et les équilibres des grands marchés du foncier, du logement et de l'emploi (Wiel, 1993).

Si, pour les géographes, s'intéresser aux villes c'est s'intéresser à la façon dont les Hommes s'organisent à l'échelle de leurs « territoires de fréquentation quotidienne » en s'agglomérant massivement, c'est aussi s'intéresser à la façon dont les Hommes peuplent la terre à des échelles plus vastes. Les villes ne sont en effet pas des entités autonomes, qui fonctionneraient indépendamment les unes des autres. Elles interagissent entre elles. Ces interactions se matérialisent par des échanges qui peuvent être matériels (échanges de biens, de personnes, d'énergie) ou immatériels (échanges d'informations, flux de communication, etc.). Ces échanges s'effectuent concrètement par des infrastructures en réseau : réseaux de routes, ferrés, lignes aériennes, réseau de transport d'énergie, réseau de télécommunication, etc. Ainsi, les villes sont intégrées dans des systèmes de villes dans lesquels se tissent des relations de complémentarité et de concurrence. Chaque ville se développe (ou pas) à l'ombre des autres, en interaction avec les autres. Elle cherche à attirer des ressources, du capital, qu'il soit financier ou humain, des fonctions de commandement, à favoriser l'innovation (ou à la copier le plus rapidement possible si elle s'avère profitable) pour rayonner au-delà de son territoire du quotidien et assurer son développement relatif (Pumain, Paulus, Vacchiani-Marcuzzo, 2009).

S'intéresser à l'organisation territoriale à cette échelle des systèmes de villes où les modalités de circulation sont déterminantes, c'est s'intéresser aux tailles des villes, à leur nombre, à leur espacement (Bretagnolle, Pumain, Vacchiani-Marcuzzo, 2007). C'est étudier, en analysant la structure morphofonctionnelle des réseaux de transport, le capital relationnel de chaque ville pour voir laquelle est la mieux placée, dans l'espace réseau et non dans l'espace euclidien, pour tisser des relations nombreuses et efficaces, vecteur de développement (Offner, Pumain, 1996). C'est analyser la répartition des fonctions entre les villes : fonctions de production de plus ou moins haut niveau, fonction d'administration, de commandement, etc. (Damette, 1994). C'est chercher à comprendre la croissance relative des villes qui peut être endogène (la croissance démographique due à l'excédent des naissances sur les décès) ou exogène (croissance due aux migrations avec des arrivées plus nombreuses que les départs) (Paulet, 2010).

L'extension des systèmes de villes est difficile à définir. En effet, selon le type d'interactions considéré, une ville peut être prise dans un système restreint (échelle régionale) ou extrêmement vaste si elle est une ville monde qui échange à l'échelle de la planète tout entière (Saassen, 1996). L'extension des systèmes villes, qui sont définis par les échanges, dépend par ailleurs fortement des conditions de transport (Berroir, Cattani, Dobruszkes, Guérois, Paulus, Vacchiani-Marcuzzo, 2017).

Plus il est simple, rapide et peu coûteux d'entrer en contact avec une ville lointaine, plus les systèmes de villes ont la possibilité d'exister à des échelles larges. Par ailleurs, des déplacements plus aisés, permettant la contraction de l'espace-temps, vont souvent aller de pair avec un processus de sélection des interactions dont les choix ne vont plus se baser sur la seule proximité physique. On interagit plus avec la ville d'à côté de façon contrainte, sous prétexte qu'elle est proche. Si les interactions sont facilitées, on peut choisir plus librement à une échelle plus large avec qui interagir pour en tirer le maximum de bénéfice, ce qui conduit souvent à court-circuiter les échelons intermédiaires pour favoriser les plus grands pôles (Bretagnolle, 2005).

Si l'extension des systèmes de villes est variable selon le type d'interactions considérées, on peut toutefois prendre comme base pour définir le système de villes d'une ville donnée, toutes les villes pour lesquelles il est possible de faire un aller-retour dans la journée et donc avec qui il est possible de mener des négociations fréquentent sans pour autant s'y rendre tous les jours (Cauvin, Reymond, Schaub, 1989). C'est aussi l'échelle « des interactions entre la grande entreprise et ses clients, entre une capitale et ses principaux relais administratifs. Quoique peu

précis, cet ordre de grandeur d'une journée assure une possibilité d'extension spatiale bien plus grande pour les territoires du pouvoir que pour ceux du quotidien » (Pumain, 1997).

Ainsi, s'intéresser aux villes pour les géographes c'est, pour reprendre la célèbre formule de Brian Berry qui proposait de résumer la conception de l'organisation de l'espace géographique par les villes en deux niveaux, considérer les « *cities as systems within systems of cities* » (Berry, 1964). Les villes sont donc des systèmes dans lesquels interagissent de nombreux acteurs ayant des intérêts, des temporalités et des niveaux de pouvoir différents (ménages, entreprises, planificateurs, etc.). Ces systèmes sont eux-mêmes imbriqués dans des systèmes de villes dont l'extension est largement formatée par les conditions de transport et qui dépend du type d'interactions considéré.

Ces systèmes de villes sont restés très longtemps des impensés, notamment en raison de l'absence de données précises portant aussi bien sur les villes que sur leurs interactions, ce qui rendait impossible une vision holistique. Même quand les systèmes de villes furent conceptualisés et même avec des états centralisés et puissants, il s'est avéré difficile d'agir globalement sur leur trajectoire (comme on a par exemple pu essayer de le faire avec la politique des métropoles d'équilibre en France dans les années 60-70). Les systèmes de villes sont en effet le fruit de décisions individuelles et collectives très nombreuses sur lesquelles personne n'a directement le contrôle. Fruit de décisions nombreuses et variées, individuelles et collectives, soumis ou pas à une volonté de planification, impliquant des échelles très variables, se développant dans des contextes géographiques, historiques, politiques très variés, on pourrait penser de prime abord que les formes prises par les systèmes de villes devraient être à l'échelle du monde très disparates. Des villes nombreuses et de petites tailles quadrillant le territoire ici, quelques très grosses villes là, ou encore des villes de taille variables ailleurs, le tout avec des dispositions spatiales allant de la plus grande concentration à des répartitions les plus homogènes. Or, il n'en est rien. Les géographes ont décrit depuis longtemps la très grande régularité des systèmes de villes dont les formes sont peu variées (Reynaud, 1841 ; Auerbach, 1913 ; Pumain, 1997). Partout on retrouve une distribution hiérarchique dans la taille des villes : peu de très grosses villes, davantage de moyennes et encore plus de petites avec des régularités dans les espacements. Mieux, cette hiérarchie peut même être décrite par une relation mathématique très précise qui subsume le lien entre la taille des villes, leur rang et leur nombre : la loi rang-taille de Zipf (Zipf, 1949) qui s'énonce de la manière suivante : si les villes d'un pays sont rangées d'après le volume de leur population de la plus grande à la plus petite, la population  $P$  d'une ville est liée à son rang  $r$  par la relation  $P_r = b.r^a$  où  $a$  et  $b$  sont des paramètres.

Cette description statistique de la hiérarchie des systèmes de villes basée sur le modèle de la loi rang taille a fait l'objet de nombreux travaux qui ont soit mis en avant son universalité, cherchant une loi unique s'adaptant partout, soit pointés les résidus du modèle, les singularités, nationales notamment, mettant à jour des hiérarchies plus ou moins marquées, ou encore des concentrations plus ou moins fortes de la population dans telle ou telle catégorie de villes, soit discutés la sensibilité du modèle aux délimitations choisies pour les villes (Arcaute *et al.* 2015). Ainsi, si la hiérarchie dans les systèmes de villes est un principe universel, ses modalités apparaissent toutefois variables à l'échelle du globe.

Après avoir révélé l'universalité des systèmes urbains hiérarchiques, il s'est agi d'en trouver les explications, de découvrir les processus à l'œuvre. Là encore les travaux sont innombrables et les approches variées. L'approche purement statistique tout d'abord Gibrat (1931) montre qu'il est banal d'obtenir des systèmes de villes hiérarchiques, qui ne seraient que le produit d'un processus stochastique de répartition de la croissance de la population dans lequel la croissance des villes est indépendante de leur taille et où la croissance au temps  $t$  est indépendante de celle

observée à  $t-1$ . Si elle peut jouer le rôle de « filtre », cette explication statistique n'en est pas moins insatisfaisante, car empiriquement on observe que les hypothèses du modèle ne se vérifient pas. Les taux de croissance entre deux dates ne sont en effet pas indépendants et la croissance n'est pas distribuée aléatoirement. La théorie des lieux centraux (Christaller, 1933) s'efforce quant à elle de rendre compte de l'organisation spatiale et hiérarchique des villes par leurs fonctions économiques (commerces et services) en se basant sur le concept clé de centralité. L'offre et la demande de biens et de services se rencontrent et s'échangent dans des « lieux centraux » privilégiés par leur accessibilité. Plus les biens et services sont rares, plus ils sont localisés dans des lieux centraux hiérarchiquement importants qui polarisent la population des lieux centraux de niveaux inférieurs. Le problème est ici que la théorie présuppose la hiérarchie, l'ordre qu'elle veut expliquer. Il en va de même pour les approches économiques qui justifient le regroupement de la population dans les villes, notamment les plus grandes, par la recherche des économies d'agglomération qui permettent l'innovation et la productivité (Marshall, 1890). Dans la recherche de l'explication de la hiérarchie urbaine, les géographes mettent eux l'accent sur la production et la diffusion des innovations (Pumain, Saint-Julien, 2010). L'innovation donne un avantage distinctif à une ville qui va plus ou moins capitaliser dessus pour croître avant qu'elle ne se diffuse aux autres villes en suivant la hiérarchie urbaine. Ici, le problème est notamment qu'il est difficile de préciser les conditions d'émergence de l'innovation et l'intensité de son impact sur la croissance. Plus récemment, des modèles dynamiques formalisés avec des équations différentielles non linéaires (Forester, 1969 ; Allen, Sanglier, 1979 ; Wei, 1988), puis des modèles s'inscrivant dans le paradigme de l'auto-organisation, qui cherchent à appréhender les comportements individuels dans leur diversité pour comprendre leurs effets sur l'organisation spatiale des systèmes de villes, se sont développés notamment au laboratoire Géographie-Cités. Ces modèles, basés sur les Systèmes Multi-Agents (Simpop, Simpopnet (Pumain, 2012a ; Schmitt, Pumain, 2013)) permettent une approche centrée sur les individus, dont les choix et interactions à l'échelle microscopique vont faire émerger des structures macroscopiques non planifiées que sont les villes et systèmes de villes. Ces modèles dynamiques qui permettent la prise en compte des interactions entre les villes ont permis de grandes avancées pour mieux comprendre l'émergence et la croissance des systèmes de villes. Compliqués, basés sur de très nombreuses hypothèses pour formaliser le comportement des individus, ou sur les liens innovation, attractivité, fonctions urbaines, croissance, etc., ils n'épuisent néanmoins pas la question de la compréhension pleine et entière des processus d'émergence et de croissance différenciée des villes.

Ainsi, il n'existe toujours pas une théorie ou science des villes, que beaucoup appellent de leurs vœux (Batty, 1991 ; Pumain, 1997), qui permettrait d'expliquer comment, à partir d'un peuplement plus ou moins homogène, émergent des concentrations de population, les villes, comment elles se mettent en réseau et croissent sur le temps long de façon différenciée, mais avec un processus (défini par Pumain en 2004 dans la revue informatique *Hypergeo* (Pumain, 2004), comme l'enchaînement dynamique de faits aux propriétés causales qui toujours conduit à des organisations hiérarchiques. On sait que l'innovation joue un rôle crucial. Pumain considère ainsi la ville comme une entité spatiale clairement identifiable, constituée d'agents sociaux (élémentaires ou non) et d'artefacts techniques, et qui est l'incubateur du changement social et de l'innovation (Pumain, 2010), mais on ne sait pas où ni comment elle va se produire. On sait théoriquement que les réseaux de transport, qui définissent la vitesse, la portée et l'hétérogénéité des interactions jouent un rôle déterminant dans la constitution et la croissance des systèmes de villes, mais il reste difficile de prévoir quel serait l'impact sur les systèmes de villes d'un changement des conditions de transport (accélération ou baisse des vitesses de déplacement; augmentation ou baisse de leur coût) ou de la nature même des interactions (substitution des interactions physiques par des interactions numériques). Difficile de prévoir l'évolution d'un

système de villes qui va soudainement se trouver connecté à un autre ou au contraire se déconnecter d'un système plus vaste. Difficile de dire si une distribution type loi rang taille des villes constitue un « attracteur » auquel il est impossible d'échapper, même avec des velléités fortes d'aménagement se traduisant par exemple par de lourds investissements dans les réseaux de transport. Difficile de dire si cette distribution hiérarchique constitue un optimum à atteindre, par exemple pour le développement économique, ou si au contraire une trop forte concentration des populations et richesses est à éviter. Difficile encore de dire s'il existe une taille de ville optimale de villes et au regard de quels critères (Prud'homme, Lee, 1999). Difficile enfin de prévoir avec le ralentissement ou même le reflux démographique, comment vont évoluer les villes et systèmes de villes (Oswalt, 2006).

On le voit, on sait aujourd'hui bien décrire les systèmes de villes, on connaît les grands facteurs explicatifs de leurs évolutions, mais il reste difficile de prévoir leurs dynamiques. Or, l'urbain est la forme majoritaire du peuplement du monde. S'y concentrent de nombreux défis sociaux, économiques, environnementaux, mais s'y trouvent aussi très certainement une partie des solutions pour faire face aux transitions énergétiques et écologiques qui s'imposent dans une perspective de développement durable (Carter *et al.* 2015). Mieux décrire, comprendre et prévoir l'évolution des systèmes de villes apparaît donc comme incontournable, dans une perspective de développement de la connaissance géographique, mais aussi pour mieux aménager les territoires. Eu égard à l'immensité des enjeux, la recherche sur les villes paraît plus que jamais nécessaire pour tendre vers une science des villes.

C'est dans cette perspective que se situe cette thèse, qui vise à contribuer autant que faire se peut à cette science des villes. Plus précisément, l'objectif est de mobiliser la modélisation dans la quête de connaissance sur l'émergence et la croissance des systèmes de villes. On vise à voir dans quelle mesure on peut, à l'image des travaux de Gibrat, avec les modèles les plus simples possible, en posant le moins d'hypothèses possible, mieux comprendre l'émergence et la croissance des systèmes de villes. Dans cette thèse, il ne sera donc pas question d'économie d'agglomération, de répartition des fonctions économiques ou encore d'émergence et de diffusion de l'innovation. Notre hypothèse centrale est en effet que les villes et les systèmes de villes dépendent des choix des individus. Choix de migrer d'une ville A à une ville B à un moment donné et contribuer ainsi à la croissance de certaines villes plutôt que d'autres. Choix de se déplacer d'une ville A à une ville B pour interagir avec d'autres individus rencontrés le long du chemin et choisir à un moment donné de fonder une « nouvelle ville » dans les lieux où l'interaction est la plus intense et la plus profitable. Dans nos modélisations, ces choix ne dépendront pas des attributs respectifs des différentes villes qui les rendent plus ou moins attractives (nature du marché de l'emploi par exemple). Ils seront au contraire tantôt aléatoires (la friction de la distance ne compte pas), tantôt motivés par les choix antérieurs faits par l'individu lui-même ou les autres individus. Ils seront ou pas conditionnés par une logique gravitaire (les villes les plus grosses et les plus proches sont les destinations privilégiées), intégrant ou pas l'anisotropie due aux différentes structures des réseaux de transport.

La logique des interactions est donc au cœur de ce travail. On vise, avec une approche basée sur les individus, à analyser si la nature des interactions et leurs conditions de réalisation qui motivent les choix des individus (interactions plus ou moins coûteuses, à plus ou moins longue portée, avec des conditions plus ou moins isotropiques selon le type de réseaux de transport, etc.) suffisent à expliquer l'émergence et la croissance allométrique des villes. L'objectif des modèles réalisés n'est pas d'être en mesure de « reproduire le réel », qui dépend en partie de l'Histoire et qui n'est donc qu'une des réalisations possibles des systèmes complexes que sont les systèmes de villes. Il est davantage de cerner, à l'aide de faits stylisés, les processus d'émergence et de croissance des villes et plus spécifiquement de mesurer le rôle de la nature des interactions.

Pratiquement, les analyses réalisées recourent principalement à la modélisation Multi-Agents qui se prête bien à une approche individu-centrée et qui permet de simuler si des interactions individuelles peuvent émerger des structures macroscopiques de villes et des systèmes de villes qui soient crédibles au regard des observations empiriques.

Après avoir précisé le positionnement de notre travail dans un premier temps, et plus précisément le choix de cibler l'interaction à l'échelle individuelle pour mieux comprendre l'émergence et la croissance allométrique des systèmes de villes, nous développerons dans un deuxième temps différents modèles permettant d'analyser les liens entre différentes logiques d'interaction et leurs effets sur la croissance allométrique des systèmes de villes. Les résultats des modèles de simulation seront systématiquement analysés au regard du modèle de la loi rang-taille qui servira de référence. Dans un troisième et dernier temps nous traiterons, toujours à l'aide d'un modèle de simulation dynamique, de la question de l'émergence des villes qui demeure peu traitée dans la littérature. Il s'agira de montrer, à l'aide d'un modèle formalisant les échanges entre individus à l'échelle individuelle, qu'il est possible de localiser des lieux propices pour des échanges nombreux et fructueux entre individus de villes différentes, ces lieux ayant vocation à terme à devenir les localisations de nouvelles villes.

# **1 Explorer les logiques d'interactions spatiales à l'échelle individuelle pour comprendre l'émergence et la croissance allométrique des systèmes de villes**

Ce chapitre a pour objectif de présenter le positionnement théorique et méthodologique de cette thèse. Il est essentiel d'avoir une définition claire des entités étudiées. Nous appréhendons le système de villes et son évolution à travers le prisme des interactions puisque nous considérons qu'il existe et perdure pour favoriser et maintenir celles-ci.

Les systèmes de villes ont pour caractéristiques d'être hiérarchisés. La hiérarchie n'étant rien de plus qu'un différentiel de croissance sur le temps long. Cette caractéristique a été longuement décrite, mais son explication ne fait pas consensus. Les études et les approches qui traitent de l'émergence de la hiérarchie urbaine sont nombreuses (descriptive, statistique, économique, géographique, etc.).

Après avoir rappelé comment un système se hiérarchise, nous ferons un état de l'art des différentes approches qui ont étudié cette dynamique. Ce n'est qu'après ce tour d'horizon des études existantes que nous nous positionnerons sur le sujet. Il reste en effet de nombreux points discutables ou à appréhender afin de mieux comprendre la dynamique de hiérarchisation et d'évolution spatiale du système de villes. Nous présenterons alors la méthode retenue et utilisée.

Deux points seront évoqués. Premièrement, la volonté d'avoir une approche volontairement « simple » reposant sur le jeu minimum d'hypothèses. Notre travail portera ainsi uniquement sur les conditions de l'interaction entre les individus formant les villes. L'individu est placé au centre de l'étude afin de comprendre les facteurs qui influencent ses interactions et *in fine* la croissance des villes. Puis deuxièmement, la volonté d'intégrer à l'étude la possibilité de simuler et reproduire l'émergence de nouvelles villes. Il faut garder à l'esprit que les systèmes de villes étudiés sont le résultat d'un long processus à partir duquel quelques foyers de peuplements se sont mis à interagir jusqu'à former un vaste et complexe système de villes dans lequel certaines villes ont émergé. La compréhension de l'émergence des nouvelles villes est donc nécessaire pour comprendre les logiques d'évolution des systèmes de villes dans le temps. Il ne sera nullement question de reproduire l'existant à partir de la localisation de quelques villes, mais plutôt de comprendre les mécanismes en œuvre.

## **1.1 Villes et système de villes : des potentiels d'interactions**

Quelle que soit la définition que l'on donne à la ville, on ne peut que constater le processus massif d'urbanisation qu'a connu la Terre, notamment depuis la révolution industrielle. Ainsi, plus de la moitié de la population mondiale vit désormais « en ville » (Véron, 2007) et cette proportion continue de croître, en particulier dans les pays en voie de développement. L'accroissement de la population des villes peut être le fait de la croissance naturelle, qui est la différence entre le taux de natalité et le taux de mortalité (la croissance endogène), ou du solde migratoire : surplus d'arrivée de population par rapport aux départs (la croissance exogène).

Fondamentalement, la ville apparaît avant tout comme un fort potentiel d'interaction entre des individus nombreux et variés, c'est-à-dire comme une forme spatiale qui permet aux individus d'entrer à moindre coût en contact avec de nombreux autres individus, qu'ils leur ressemblent ou pas. Ce haut potentiel d'interaction entre individus est l'essence même de la ville, car il permet l'émergence des « économies d'agglomération » (Marshall, 1890), qui sont au cœur du processus d'agglomération. Si les entreprises et individus se regroupent, c'est parce qu'ils ont quelque chose à y gagner. En effet, la proximité spatiale offre une multitude d'avantages économiques. Les économies d'agglomération désignent ainsi les bénéfices qui sont externes à l'entreprise et

qui proviennent de la densité et de la diversité des agents économiques au niveau local. Marshall (Marshall, 1890) a identifié très tôt trois sources d'économies d'agglomération :

1. Pour les entreprises, la proximité spatiale leur permet notamment de partager des infrastructures caractérisées par des coûts fixes élevés, des fournisseurs spécialisés, de bénéficier d'un large ensemble de main-d'œuvre spécialisée, de débouchés pour la production ou encore d'une image commune.
2. Pour les travailleurs, l'agglomération d'entreprises leur offre un large éventail d'opportunités d'emplois et ils ont ainsi plus de chances de trouver un emploi qui leur convient en matière de préférences et de niveau de qualification (ce qui est particulièrement vrai pour les couples biactifs).
3. Enfin, la proximité spatiale permet une meilleure diffusion des savoirs, des idées nouvelles et des technologies. Cette circulation d'informations et d'idées constitue une condition nécessaire pour le processus d'innovation, qui est un des déterminants pour la croissance économique et la compétitivité (Prud'homme, Lee, 1999 ; Glaeser, 2011).

Ainsi, les économies d'agglomération permettent une hausse de la productivité et une baisse des coûts pour les entreprises. À l'échelle de la ville, le potentiel d'interaction dépend de la densité de la population et de la vitesse des déplacements qui conditionnent le nombre de gens effectivement accessibles en un temps donné avec un ou plusieurs modes de transport. La ville constitue donc une forme spatiale qui favorise l'accessibilité, qui correspond à la quantité de ressources (population, emplois, services) accessibles depuis une localisation donnée, en un temps donné, avec un mode de transport donné (Handy, Niemeier, 1997). Pour les individus, un haut niveau d'accessibilité à la population, souvent appelée potentiel d'interactions sociales (Farber *et al.* 2014), permet en outre une vie sociale riche à travers l'échange d'information en face à face (Maslow, 1943 ; Urry, 2002). Ainsi, la recherche de la minimisation des coûts de l'interaction (coût du transport) est un élément crucial pour la compréhension de l'agglomération spatiale des activités économiques et des individus dans les villes.

À l'échelle interurbaine, cet objectif d'un fort potentiel d'interaction est également recherché. Comme nous l'avons vu précédemment, les villes ne fonctionnent pas de façon isolée. Elles sont intégrées dans des systèmes de villes (Berry, 1964) au sein desquels elles échangent et nouent des relations de complémentarité et concurrence. Pour une ville, pouvoir en joindre rapidement d'autres (en particulier les plus importantes) et donc avoir un fort potentiel d'interactions interurbaines, notamment à l'échelle d'un aller-retour dans la journée, est primordial pour le développement économique (Duranton, Turner, 2012 ; Ottaviano, 2008). C'est en effet le plus souvent dans les grandes villes que sont concentrées les fonctions de commandement (économique et politique) et il est stratégique de ne pas se tenir trop éloigné de ces lieux de pouvoir. C'est pourquoi tant d'investissements sont réalisés dans les infrastructures de transport pour être accessibles dans l'espace réseau (Statistiques des transports, CGDD/SOeS, 2016), en particulier quand on ne l'est pas, ou mal, dans l'espace euclidien.

Les systèmes de villes se matérialisent par l'intensité des échanges qui existent entre les villes et qui sont largement conditionnés par les infrastructures de transport. Plus les échanges seront nombreux et variés entre les villes, plus le système sera « solide », à la fois connexe et connecté. L'extension des systèmes de villes dépendra de la facilité de l'interaction. Plus les déplacements seront peu coûteux et rapides, plus il sera possible d'interagir à longue portée et donc plus les systèmes de villes seront vastes. Notons néanmoins que, le plus souvent, les systèmes de villes trouvent leur cohérence dans les espaces nationaux en raison d'une communauté économique, culturelle et politique. Les flux entre villes concernent les marchandises et l'information, mais aussi les hommes, soit avec des déplacements temporaires, soit avec des migrations définitives.

*In fine*, si on considère des comportements démographiques relativement semblables à l'échelle d'un système de villes, ce sont l'intensité et l'asymétrie éventuelle des migrations définitives d'individus qui vont conditionner la croissance allométrique du système de villes.

Ainsi, les villes ne sont pas des entités isolées. Elles sont des lieux de l'interaction à l'échelle du quotidien, et interagissent entre elles dans des systèmes de villes plus ou moins étendus dont le fonctionnement dépend grandement de la métrique des systèmes de transport. Ce sont ces échanges qui permettent aux villes de se « copier », de perpétuellement s'adapter aux évolutions pour durer. Elles interagissent et coévoluent. On retrouve bien ici une hypothèse fondamentale de la Géographie, à savoir ce qui se passe en un lieu n'est pas indifférent à ce qui est, ou se produit, dans un autre lieu. C'est en partie ce processus de coévolution qui explique la très grande résilience et stabilité des systèmes de villes dont peu d'éléments disparaissent, sauf sur le temps très long. C'est aussi cette stabilité des systèmes de villes qui rend leur « prédictibilité » possible, au moins à moyen terme (Pumain, 2017). Les systèmes de villes évoluant peu sur le court terme, l'anticipation est possible, mais elle est plus difficile sur le long terme qui peut voir des bifurcations se produire.

La plus grande part de la population et des richesses du monde étant en ville, il est stratégique d'être capable de bien caractériser les systèmes de villes, de les expliquer et d'en prévoir les évolutions. Ce sont ces connaissances qui permettront de définir et d'évaluer les politiques d'aménagement à toutes les échelles pour tendre vers des territoires plus durables. Pour comprendre, expliquer et prévoir l'évolution des villes, il est nécessaire de les envisager en systèmes, de considérer leurs interactions, plutôt que de se contenter d'analyser leurs particularismes locaux, aussi bien économiques que démographiques. Le problème réside dans le fait que, comme l'évolution d'une ville est conditionnée par les autres à différents niveaux d'échelle dans des systèmes de villes ouverts, on est en présence de systèmes complexes dont les évolutions sont difficiles à appréhender.

## **1.2 Les systèmes de villes : des systèmes complexes**

Les systèmes de villes sont des systèmes dans lesquels les interactions sont nombreuses et se réalisent à des échelles variées, ce qui rend difficile la maîtrise de leur évolution. Fort heureusement, ces interactions ne sont pas aléatoires, comme on peut parfois le voir dans des systèmes physiques. Elles obéissent, comme l'ont montré depuis longtemps les géographes, à des règles, à des principes que nous allons rappeler ci-dessous et dont l'existence explique le fait qu'il soit raisonnable d'avoir l'ambition de comprendre l'évolution des systèmes de villes.

### **1.2.1 Une brève définition de l'interaction spatiale**

Pour Claude Grasland<sup>1</sup>, en accord avec Fotheringham et O'Kelly (Fotheringham, O'Kelly, 1989), s'intéresser aux interactions spatiales revient à mettre en relation quatre ensembles de variables :  $F = f(E, A, I)$  où:

- $F$  : une ou plusieurs matrices de dimension  $[m.n]$  décrivant les échanges (de toute nature) entre  $m$  lieux d'origine et  $n$  lieux de destination.
- $E$  : un ou plusieurs vecteurs de dimension  $[m]$  décrivant les capacités d'émission des lieux d'origine.
- $A$  : un ou plusieurs vecteurs de dimension  $[n]$  décrivant les capacités d'attraction des lieux de destination.

---

<sup>1</sup> [http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/anspa/inter/Chap4\\_1.htm](http://grasland.script.univ-paris-diderot.fr/anspa/inter/Chap4_1.htm)

- I : une ou plusieurs matrices de dimension  $[m.n]$  décrivant le degré de séparation des lieux d'origines et de destination qui va conditionner l'intensité de l'échange.

Établir un modèle d'interaction vise donc à relier les valeurs de la matrice de relation F avec les valeurs correspondantes des matrices E, A et I sous différentes hypothèses. Ainsi, pour décrire et comprendre les interactions dans un système il va falloir choisir :

- La matrice d'interaction (F) : dans le cas des systèmes de villes ce seront les échanges d'individus qui déménagent de  $i$  à  $j$ .
- Les facteurs d'émission (E) : qu'est-ce qui fait que beaucoup de gens partent ou pas ?
- Les facteurs d'attraction : pourquoi telle ou telle ville attire ?
- Les facteurs d'éloignement (D) : comment mesurer l'éloignement (mesure de la distance).

C'est cette intégration d'une mesure d'éloignement qui distingue les approches géographiques, des approches économiques ou sociologiques.

- Éventuellement une fonction de décroissance des interactions en fonction de la distance  $f(D)$ . La distance joue alors comme un frein à l'interaction.
- La forme générale du modèle et ses contraintes (les capacités d'émission et de réception des lieux).
- Les critères d'ajustement et la détermination des paramètres à estimer.

### 1.2.2 Les logiques des interactions spatiales dans les systèmes de villes

L'analyse des localisations et des interactions entre lieux est une des grandes questions de la Géographie. Les travaux sont donc nombreux, en particulier ceux reprenant la logique gravitaire (Reilly, 1931), qui ont essayé de comprendre les logiques des interactions observées, quelle qu'en soit la nature. En reprenant Tannier (Tannier, 2017), on peut tenter une synthèse de ces grands principes qui régissent les interactions :

1- L'interaction naît de l'hétérogénéité spatiale et va de pair avec des relations de complémentarité-concurrence :

L'espace n'est pas homogène ni uniforme. Comme il n'y a pas « de tout partout » et comme il y existe une forte hétérogénéité spatiale, des spécialisations locales vont inévitablement se produire selon les caractéristiques et potentialités locales des lieux, par exemple en termes de productions agricoles. Le besoin d'interaction, la nécessité de l'échange, va donc être la conséquence de l'hétérogénéité spatiale et des spécialisations conséquentes. Des relations de complémentarité vont donc se tisser entre les villes. Toutefois, comme plusieurs villes vont pouvoir se spécialiser dans les mêmes productions ou services, ces relations de complémentarité vont se doubler de relations de concurrence. Il s'agit alors d'attirer le capital humain, financier, technique, etc. pour s'imposer sur les productions choisies. Selon le type d'échanges envisagé, les interactions entre villes seront plus ou moins dissymétriques en termes d'intensité de flux (de matières, de personnes, de valeur) et concerneront des ensembles de villes plus ou moins importants (des « cliques » de villes pour reprendre la terminologie de la théorie des graphes).

2- La logique des interactions est principalement une logique gravitaire. L'intensité des interactions dépend de la taille des villes et de leur distance:

Si on cherche à comprendre qui échange avec qui et avec quelle intensité, on retombe inévitablement sur la logique gravitaire, à tout le moins pour tous les échanges pour lesquels la distance joue un rôle de friction. Ainsi, les échanges les plus importants se déroulent entre les

polarités les plus grosses et les plus proches. Les villes les plus importantes en termes de population possèdent en effet des capacités d'émission les plus fortes, mais aussi très souvent les capacités d'attraction les plus importantes. Ces capacités sont, en effet, globalement corrélées à la population totale. Comme le note Pumain, « la variable démographique est un excellent (et le meilleur) résumé de très nombreuses propriétés fonctionnelles des villes. Beaucoup de descripteurs quantitatifs, comme le nombre d'emplois, d'établissements ou de logements... mais aussi qualitatifs, comme la diversité ou la rareté des activités et la variété des populations présentes, sont corrélés à la taille des villes. C'est la principale dimension, c'est-à-dire le facteur de différenciation essentiel dans un système de villes (Reiner, Parr, 1980) » (Pumain, 1997).

### 3- Les interactions sont plus importantes au sein d'un même « territoire » :

Les villes et individus d'un même « ensemble » partagent le plus souvent une identité commune, une même langue, une législation commune, etc., autant d'éléments qui vont faciliter les échanges à l'intérieur de l'ensemble plutôt que les flux entre ensembles différents. Par exemple, une région frontalière entretiendra très systématiquement des interactions plus soutenues avec les régions de son pays qu'avec celles de l'autre côté de la frontière, même si elles sont plus proches. C'est le rôle de barrière aux flux joué par les frontières que de nombreux auteurs ont relevé et mesuré (Grasland, 2010). L'intensité de l'interaction (économique, culturelle, migratoire, etc.) dépend donc de l'appartenance territoriale.

### 4- Le principe de minimisation de l'énergie : les entités proches échangent plus que celles qui sont lointaines :

Le principe de minimisation de l'énergie ou principe du moindre effort a bien été décrit par Zipf (1949) pour expliquer la logique des implantations humaines. Il renvoie à la notion d'optimisation des localisations. Pour Zipf, il existe deux tendances contraires 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, 1949, cité dans le travail de Varenne (Varenne, 2016). En plus bref, les individus cherchent à minimiser l'énergie, le temps ou le coût dépensés lors de leurs déplacements. La friction qu'impose la distance aux échanges (la distance est un coût, quelle qu'en soit la nature) est donc un frein aux interactions. Cette friction est variable dans le temps et l'espace, et dépend grandement des réseaux de transport.

Ainsi, l'intensité des interactions relève donc d'une logique gravitaire selon laquelle plus les entités sont grosses et proches (pour une métrique donnée), plus elles vont échanger. Bien entendu, il existe de nombreuses critiques au modèle gravitaire exprimé ici dans sa plus simple expression. Par exemple, l'existence d'occasions interposées entre un lieu  $i$  et un lieu  $j$  qui font que le flux de  $i$  à  $j$  va souvent être moins important que ce que le laisserait supposer le modèle gravitaire simple. Néanmoins, en première approximation, on peut considérer que l'intensité des interactions relève globalement d'une logique gravitaire.

## 5- Dépendances d'échelles et dépendances temporelles :

Pour comprendre les interactions dans un système de villes, il est important d'avoir en tête que les villes sont prise dans des dépendances d'échelles, ainsi que dans des dépendances temporelles. Chaque ville est en effet imbriquée dans des échanges dont les portées varient en fonction du type d'interaction. On retrouve ici la logique de la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933). Pour les échanges banaux, l'interaction se fait avec les villes de proximité puis, plus les interactions concernent des biens et services rares, plus elles s'effectuent avec des villes importantes qui concentrent ces fonctions spécialisées, regroupées dans des lieux rares. Ainsi, selon le type d'interaction, il faut définir et prendre en compte des systèmes de villes plus ou moins larges. Pour l'étude de la croissance allométrique des systèmes de villes, il convient de considérer le système le plus large et cohérent possible, car les migrations résidentielles peuvent tout à la fois s'effectuer dans les villes proches comme dans les villes lointaines.

Enfin, pour comprendre un système de villes et les interactions qui s'y déroulent au temps  $t$ , il est nécessaire d'analyser ce système avec une profondeur temporelle plus ou moins importante. En effet, l'état du système au temps  $t$  dépend partiellement de ce qui s'est passé préalablement. La logique actuelle du système et son devenir sont partiellement conditionnés par sa trajectoire historique. C'est la notion de *path dependency* (Sanders, 2014). Il faut prendre en compte l'histoire des lieux, placer leur évolution dans une chronologie. Par exemple, ne pas prendre en compte l'histoire rend impossible la compréhension du peuplement actuel du bassin minier du nord de la France.

Étudier l'évolution du peuplement dans les villes, oblige donc à considérer que les villes font systèmes et que de ce fait il est obligatoire de s'intéresser à leurs interactions pour comprendre leur coévolution. Les interactions sont de natures diverses, elles sont nombreuses, se déroulent à des échelles différentes, dépendent tout à la fois partiellement des trajectoires historiques et de logiques géographiques relevant globalement de la logique gravitaire, à tout le moins lorsque la distance joue un rôle de friction pour les échanges.

Comprendre l'évolution de ces systèmes de villes ouverts (de nouvelles interactions peuvent se créer à tout moment, ajoutant ainsi des villes aux systèmes), aux interactions nombreuses et variées, dont la dissymétrie conditionne en partie les coévolutions, s'avère être un défi particulièrement difficile, car si ces systèmes sont compliqués (de nombreux éléments sont en interaction), ils sont surtout complexes.

### 1.2.3 Les systèmes de villes...

Les systèmes de villes sont des entités spatiales qui sont composées d'un grand nombre d'éléments (villes, réseau routier, individus, etc.) en interaction. La trajectoire des systèmes de villes est incertaine, car complexe. Cependant, ces entités spatiales ont su évoluer pour faire face aux différents événements historiques et perdurer dans le temps.

#### 1.2.3.1 Des systèmes complexes ...

Les systèmes de villes sont des systèmes compliqués. Par compliqués, on entend des systèmes composés d'un grand nombre d'éléments, parfois organisés en sous-systèmes, eux-mêmes pouvant être composés de sous-systèmes. En théorie, il n'existe pas de limite à la complication, car on peut sans cesse connecter des systèmes compliqués entre eux. Un moteur est ainsi un système compliqué. Toutefois, la différence entre le moteur et le système de villes est que le premier est compliqué alors que le second est compliqué, mais aussi complexe.

En effet, le fonctionnement du moteur d'avion peut être compris par une approche réductionniste. On comprend chaque élément, leurs assemblages, pour au final comprendre le tout et pouvoir prévoir son fonctionnement. Pour les systèmes de villes, il en va différemment. Même si ses nombreuses composantes sont connues, ses interactions non-linéaires, le fait que le comportement d'un élément soit influencé par ceux des autres, engendrent des comportements qui échappent au réductionnisme et rendent la prévision très difficile. L'existence à l'échelle microscopique d'interactions nombreuses, le cas échéant non-linéaires, la présence de boucles de rétroaction, va se traduire par l'émergence de niveaux d'organisation d'ordre macroscopique non « intentionnels ». Ces systèmes complexes se caractérisent par des phénomènes d'auto-organisation, auto-organisation qui se définit comme une propriété d'un « système dont l'organisation ne résulte pas de forces extérieures, mais de l'interaction de ses éléments » (Dauphiné, 2003), et ils peuvent connaître des bifurcations (Prygogyne, Allen, Herman, 1997), c'est-à-dire des évolutions brusques, non prévisibles au départ. Ils se caractérisent aussi par une sensibilité aux conditions initiales. Pour un même système, de petites différences de conditions initiales peuvent conduire à des trajectoires résolument différentes (Deffuant, Banos, *et al.* 2015). Les systèmes de villes sont donc bien des systèmes complexes (Pumain, Reuillon *et al.*, 2017). Les entités en relation (les villes) sont nombreuses, elles ont des caractéristiques différentes (de taille par exemple). Elles interagissent et les interactions dépendent les unes des autres. Les individus qui migrent de  $i$  à  $j$ , ne migrent pas en même temps de  $i$  à  $k$ . La croissance démographique de  $j$ , qui est connectée à un ensemble de villes  $m$ , va conditionner leur attractivité relative. Les évolutions, par exemple la création d'une innovation, ne se produisent pas partout au même moment et ne se diffusent pas partout à la même vitesse. Toutes les villes n'ont pas au temps  $t$  les mêmes capacités relationnelles, eu égard à leur localisation dans l'espace euclidien et à l'état des infrastructures de transport. Les individus (dont les décisions en matière de démographie et de mobilité, qu'elles soient rationnelles ou pas, dictent l'évolution du système) ont leur stratégie et peuvent tenir compte des stratégies passées ou projetées des autres individus. Toutes ces coévolutions, ces interactions complexes marquées par des dépendances d'échelles et temporelles vont donc rendre très difficile à comprendre l'émergence et l'évolution des systèmes de villes.

### ***1.2.3.2 ... et adaptatifs***

Une autre caractéristique des systèmes de villes est qu'ils sont adaptatifs, ce qui explique leur persistance dans le temps (leur résilience), en raison des relations de complémentarité-concurrence qui s'y tissent, comme mentionné préalablement. Ce sont donc des systèmes adaptatifs complexes (SAC), terme que nous préférons à système auto-organisé, qui ne fait pas référence à cette capacité adaptative. La ville et le système de villes sont composés de nombreux éléments qui interagissent dans le temps long, tout en composant avec des changements de leurs environnements (économiques, techniques, politiques). Cette persistance des systèmes de villes signe leur capacité adaptative. Selon Jean-Claude Heudin (Heudin, 1998), ce sont donc des systèmes complexes qui, par le jeu des interactions, du traitement de l'information et de la concurrence entre les entités du système, vont faire émerger des solutions visant à accroître l'adaptation du système face à son environnement. L'adaptation passe principalement par le phénomène d'émergence qui est l'apparition d'une nouvelle structure au niveau supérieur, sans que la simple combinaison des éléments ou de leur processus puisse l'expliquer (Heudin, 1998). Cette émergence est le fruit de deux classes de processus que l'on retrouve au sein des systèmes complexes : la variation et la stabilisation. Ce sont eux qui créent la complexité au sein d'un système.

Pour s'adapter, le système va connaître une variation au sein de son organisation. L'interaction entre les éléments va se modifier pour faire face à la contrainte que subit le système. Les éléments vont se réorganiser différemment, modifier leur stratégie propre. Ainsi, la somme de chaque changement de stratégie d'interaction va entraîner une modification de l'organisation du système. On va parler d'émergence d'un nouveau niveau d'organisation. Par exemple, on est passé d'un système de peuplement composé de villes isolées et de taille relativement identique à un système de villes connectées et hiérarchisées. Ce n'est qu'une fois que l'émergence se fait que le système va alors se stabiliser jusqu'à la prochaine variation. C'est ce processus qui permet à un SAC de s'adapter en modifiant son organisation.

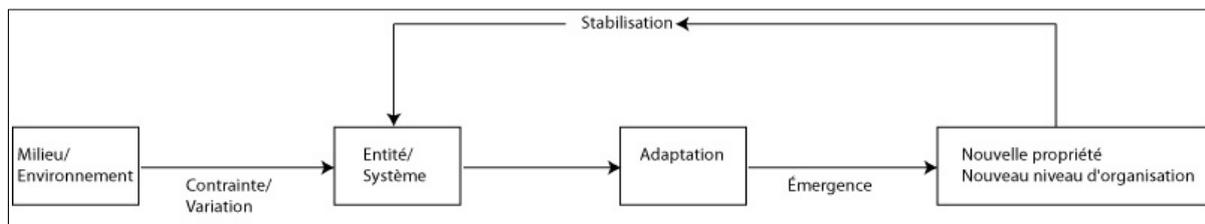


Figure 1: Principe de variation-stabilisation (Heudin, 1998)

L'adaptation peut prendre de nombreuses formes. Dans le cas de l'étude de l'émergence de la hiérarchie urbaine, on considère que l'émergence passe par un changement d'état, une évolution. Dans le cas du peuplement, il s'agit de l'émergence de nouvelles entités socio-spatiales telles que les villes. Ce processus d'adaptation ne peut être correctement étudié qu'avec une double vision : *Bottom up* et *Top down*. Cette démarche explique que le niveau local est responsable de l'émergence, tandis que le niveau supérieur ou global contraint et définit la sélection des individus, comme l'explique Francisco Varela dans Benkirane (Benkirane, 2006). Il y a une relation forte entre ces deux niveaux d'études.

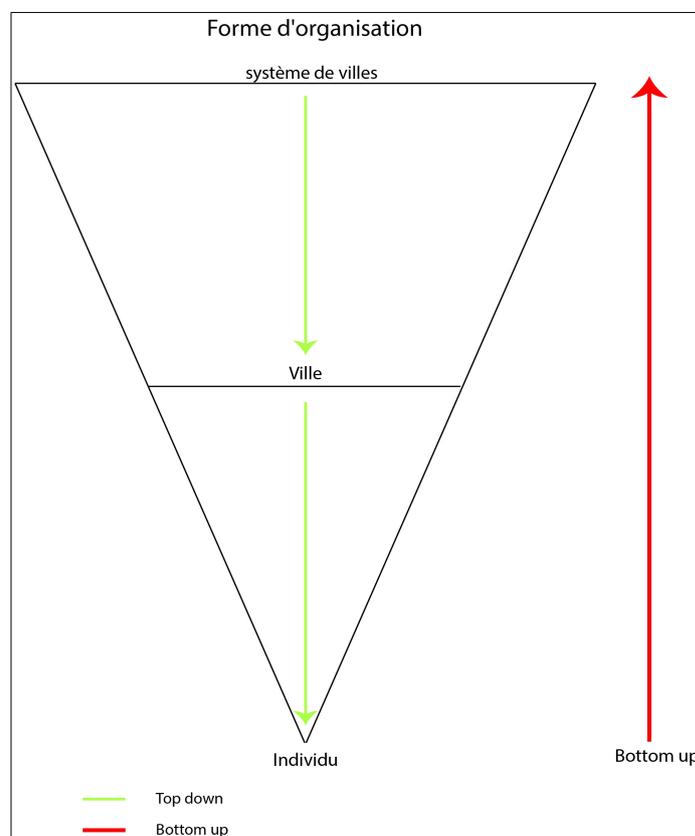


Figure 2: Approche différentielle et complémentaire en systémique

L'émergence d'un nouveau niveau d'organisation est donc le résultat d'une évolution qui passe par une augmentation de la complexité des interactions des éléments. Dans le cas du système de villes, cette complexification entraîne une augmentation des interactions entre les villes. Depuis le premier regroupement d'individus jusqu'à l'émergence du système de villes, la complexité des interactions n'a eu de cesse d'augmenter en renforçant dans le temps long la régularité des échanges, mais aussi en les rendant asymétriques. La ville favorise l'interaction entre individus, et le système de villes les interactions entre les villes.

Sanders résume les questions de dépendance d'échelles, temporelles et d'émergence dans la dynamique des systèmes de peuplement vus jusqu'ici : « 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*) » (Sanders, 2014).

Ainsi, les systèmes de villes sont des entités socio-spatiales complexes prises dans des jeux de dépendances d'échelles et temporelles, qui s'adaptent à leur environnement grâce à des relations de concurrence/complémentarité, et qui peuvent connaître des émergences, des bifurcations, ce qui rend leur évolution particulièrement difficile à décrire, comprendre et prévoir. Aussi, les trajectoires de ces systèmes étant difficilement « prévisibles » sur le temps long, une même configuration initiale de peuplement pouvant théoriquement conduire à des structures spatiales totalement différentes, on peut s'interroger sur l'opportunité même de vouloir comprendre et expliquer ces systèmes, en saisir les lois, les processus génériques, s'ils existent. Peut-être faut-il se contenter d'en décrire l'unicité en relation, notamment avec leur histoire, plutôt que de chercher à comprendre « les lois gouvernant le comportement des sociétés à la surface de la Terre ? », objectif assigné à la Géographie (Brunet, 2000). Fort heureusement, l'observation empirique des systèmes de villes montre que l'infinie variété théoriquement possible de configurations spatiales n'existe pas. Bien au contraire, les systèmes de villes se caractérisent par un certain nombre de traits génériques, à commencer par l'omniprésence de configurations hiérarchiques, qui invitent à dépasser la tentation idiographique pour aller vers une démarche nomothétique. Ces traits génériques invitent à vouloir expliquer et comprendre, voire prévoir, plutôt que seulement décrire.

### **1.3 La hiérarchie, principal trait générique des systèmes de villes**

L'observation empirique, conduite depuis des décennies par les géographes, montre que partout la distribution statistique des villes est hiérarchisée, bien qu'à l'origine le peuplement ait été composé d'agglomérations isolées de taille relativement identique (Bairoch, 1985). La hiérarchie urbaine correspond à une distribution inégale des villes selon leur taille (leur population) qui varie entre les ordres de grandeur  $10^3$  -  $10^7$  habitants. La hiérarchie est le résultat de la croissance naturelle des villes et de leur solde migratoire. Ces croissances sont inégales entre pays. La croissance des villes d'Europe n'est par exemple absolument pas la même que celles de certaines

villes d'Asie. Elles reflètent la transition démographique et certains aspects sociétaux et économiques des régions ou pays étudiés. En effet, la croissance naturelle, qui est la différence entre les naissances et les décès, est fonction de la politique sociale et économique d'un pays. La sécurité alimentaire d'un pays ou ses conflits sont deux des nombreux autres facteurs qui peuvent expliquer la croissance naturelle. Il en est de même pour le solde migratoire où de nombreux facteurs peuvent rentrer en compte tels que les guerres, les primes à la mobilité ou la politique d'accueil menée par certaines régions ou pays. Chaque système de villes possède ses propres caractéristiques, son propre environnement, sa propre histoire. Cependant, tous ont une structure hiérarchique.

Cette hiérarchie peut même être décrite par une relation mathématique précise qui résume le lien entre la taille des villes, leur rang et leur nombre : la loi rang-taille (Zipf, 1949) qui s'énonce de la manière suivante : si les villes d'un pays sont rangées d'après le volume de leur population, de la plus grande à la plus petite, la population  $P$  d'une ville est liée à son rang  $r$  par la relation  $P = b \cdot r^a$  où  $a$  et  $b$  sont des paramètres. On a donc très peu de grandes villes, plus de moyennes et encore davantage de petites. Après avoir vérifié cette relation sur les 100 plus grands districts des USA en 1940, Zipf donne l'équation de la droite correspondante :

$$\log P = -0.98 \log r + 77.05.$$

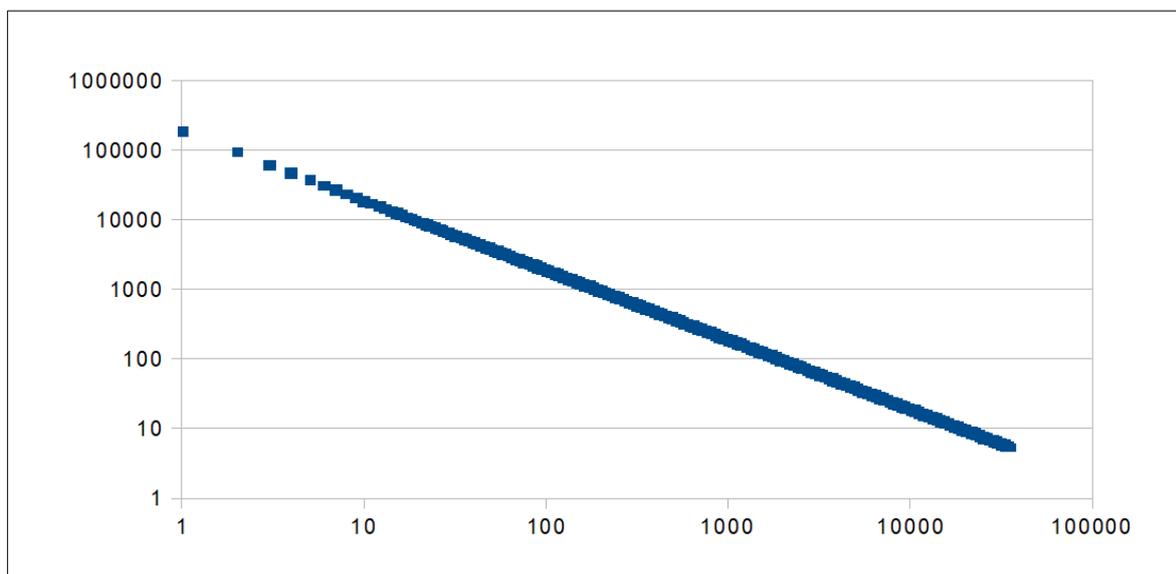


Figure 3: Distribution hiérarchique théorique selon Zipf de la France en 2017 (en ordonnée la population, en abscisse le rang) selon l'INSEE

L'équation de la droite varie toutefois selon la définition des entités sélectionnées (Arcaute *et al.* 2015). La relation rang-taille est donc une « relation linéaire inverse entre le rang et la taille des communautés humaines », mais il convient toujours de préciser la définition des communautés considérées (Nicolas, Radeff, 2012). L'équation varie aussi en fonction des systèmes de villes étudiés, des singularités nationales, continentales ou historiques (Pumain, Moriconi-Ebrard, 1997). Si le cas particulier de la loi rang-taille requiert un coefficient de 1, dans les faits en 1980 le coefficient  $b$  variait par exemple entre les valeurs de 0.809 (Maroc) et 1.963 (Australie) (Rosen, Resnick, 1980).

Précisons enfin qu'il n'existe aucun principe explicatif unique lié à la « loi de Zipf ». Celle-ci correspond à une façon de présenter graphiquement les relations entre deux variables liées par un rapport fixe (« *scale invariance* ») (Nicolas, Radeff, 2012). Ce n'est donc pas une référence

explicative, mais seulement descriptive d'une structure particulière et régulière des systèmes de villes. La loi rang-taille est statique et a-spatiale. Ainsi, si la question de son émergence, de sa croissance et de son ubiquité reste encore largement posée, il n'en demeure pas moins que la hiérarchie dans les systèmes de villes est un fait universel sur la Terre.

Un deuxième invariant caractérisant les systèmes de villes concerne leur stabilité. Certes, telle ou telle ville d'un système peut évoluer en renforçant sa place dans la hiérarchie urbaine ou au contraire en déclinant (Paulus, 2004), mais globalement la structure des systèmes reste très stable, même si la dimension des systèmes augmente (plus de villes, plus grosses) et que de ce fait l'espacement entre les villes a tendance à se réduire. Cette stabilité des systèmes urbains est à mettre sur le compte de leur capacité d'adaptation vue précédemment.

Un troisième trait générique concerne la spécialisation fonctionnelle des villes. Toutes les fonctions urbaines, en particulier les fonctions de commandement les plus discriminantes comme les emplois métropolitains, ne se retrouvent pas dans toute la hiérarchie des villes. Les fonctions de plus haut niveau sont ainsi systématiquement localisées dans les villes de plus grande taille (Rozenblat, 2004). En bref, cette hiérarchie s'explique par la théorie des lieux centraux de Christaller (Christaller, 1933). Les villes peuvent être classées en catégories selon leur taille et leur spécialisation. Elles sont agencées entre elles de manière ordonnée dans un système au sein duquel chacune va avoir son espace d'attraction. Elles sont imbriquées selon un système d'échelle en fonction de la portée des services et activités présents en leur sein qui vont influencer les interactions et leur attractivité. Les grandes villes cumulent alors la majorité des services principaux et les services plus rares que seule la masse de population peut rendre rentables.

Ainsi, bien qu'étant des systèmes adaptatifs complexes aux trajectoires théoriquement très variées, les systèmes de villes empiriques montrent des traits génériques très importants, à commencer par l'omniprésence de structures hiérarchiques. La récurrence de ces structures tend à indiquer que les systèmes de villes sont soumis à des processus globaux communs qui président à leur évolution. Ce sont ces processus que les géographes, mais aussi les économistes, s'efforcent de mettre à jour depuis des décennies pour mieux maîtriser l'évolution des systèmes de villes. Il ne s'agit pas seulement de décrire les régularités, mais de les expliquer en recourant à la modélisation.

#### **1.4 Le nécessaire recours à la modélisation pour aborder les systèmes de villes**

En Géographie, comme dans les autres sciences sociales, l'expérimentation n'est pas possible pour mettre à jour « les lois gouvernant le comportement des sociétés à la surface de la Terre » (Brunet, 2000). Aussi, les géographes n'ont longtemps pas eu d'autres choix méthodologiques que l'observation, essayant d'inférer de la multitude de cas d'étude, choisis pour être les plus comparables possible, des règles, lois ou processus génériques. Le problème est que cette démarche inductive butte souvent sur l'unicité des cas d'étude qui diffèrent toujours en matière de contexte socio-spatial ou historique, rendant difficile toute généralisation. Dans les sciences sociales, il est impossible de « contrôler les paramètres de l'expérience et de raisonner toutes choses égales par ailleurs ». C'est pourquoi la démarche inductive s'est doublée, notamment dans la deuxième moitié du XXe siècle, d'une approche déductive à la base d'une approche modélisatrice.

Un modèle peut se définir comme une « représentation idéalisée du monde réel construit pour démontrer certaines de ses propriétés » (Haggett, 1965) ou encore comme « une présentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre » (Durand-Dastès, 2001). Modéliser, c'est donc entrer dans une démarche d'abstraction. C'est écarter le particulier pour ne conserver que les traits génériques. Le modèle est souvent un filtre qui permet de séparer

l'important (l'explicatif), de l'aléatoire (le singulier). Le modèle est aussi une référence, car on ne peut comprendre qu'en comparant à quelque chose de connu et donc de déjà compris. Le modèle a donc une fonction de « médiation dans une enquête de connaissance, c'est un moyen et non une fin comme peut l'être une théorie » (Varenne, 2017). Par conséquent, comme le note Chamussy dans sa définition du modèle en 2004 dans *Hypergeo*, « un modèle est nécessairement simplifié, sinon il serait la réalité elle-même et ne contribuerait en rien à la construction de la connaissance. C'est donc une représentation abstraite. Ce qui signifie que l'approximation, et même l'erreur, est inhérente aux modèles » (Chamussy, 2004).

Le modèle comme référence, comme filtre, peut être utilisé pour décrire. C'est l'exemple du modèle de Zipf qui permet de comparer les systèmes de villes du monde par rapport à une référence commune en cherchant ensuite à expliquer les résidus au modèle. Mais le modèle est surtout utile pour comprendre et expliquer. Il a une fonction d'intelligibilité (Epstein, Joshua, 2008). Il permet de mettre en évidence des processus, d'en révéler la complexité ou au contraire la simplicité, de questionner la théorie en mettant à jour de nouvelles questions, des incertitudes. Il peut aussi le cas échéant aider à la décision et constitue souvent un puissant outil de communication (pour informer et éduquer).

Quand il a une fonction d'intelligibilité, le modèle a nécessairement un fort arrière-plan conceptuel (Durand-Dastès, 1974). Par exemple, derrière le modèle de Christaller se trouvent des concepts ou théories comme l'*homo economicus*, l'information complète ou encore la maximisation du profit. Ainsi, comme l'évoque Chamussy, « la théorie permet de progresser dans la construction des modèles, qui eux-mêmes enrichissent à leur tour - ou éventuellement contredisent la théorie. On retrouve ici la progression en boucles de la construction de la connaissance » (Chamussy, 2004).

Un modèle peut ainsi être un outil d'exploration pour tester des hypothèses, un outil empirique pour valider une théorie sur des jeux de données, un outil explicatif pour révéler des causalités et ainsi des processus internes au système, un outil constructif pour construire itérativement une théorie conjointement avec celles des modèles associés (Varenne, 2010).

La spécificité des modèles en Géographie, notamment des modèles de simulation, est qu'ils doivent prendre explicitement en compte l'espace, ce qui passe par l'introduction de mesures de distance. Leur objectif est de faire le lien entre des équations, des processus, etc. et des formes spatiales (exemples avec Von Thünen, 1842 ; Reilly, 1931 ; Christaller, 1933) ; d'être en mesure de reproduire des dynamiques et pas seulement des structures et donc comprendre comment se passent les choses, ce qui permet d'anticiper (une même structure peut être le fruit de dynamiques différentes) ; d'être en mesure de simuler l'émergence qui naît d'interactions à l'échelle individuelle et donc d'appréhender la complexité (Banos, 2013).

Plus concrètement, pour les systèmes de villes, la modélisation doit permettre de comprendre, expliquer et même prévoir pour aider à construire des scénarios pour le futur (Pumain, 1997). Si ce n'est pas l'aléa qui explique les implantations humaines et leurs dynamiques, pourquoi cette ville va se développer plus vite que telle autre ? Quels sont les processus en jeu et leur poids respectif ? La structure observée peut être le fruit d'autres processus que ceux modélisés ? Ces processus sont-ils bien ceux du réel ? Pourquoi une ville émerge-t-elle ici et maintenant ? Telles sont les questions auxquelles un modèle doit aider à répondre.

La modélisation a donc une fonction de filtre qui permet de voir ce qui est simple et ce qui ne l'est pas dans l'explication des établissements humains, ce qui est explicatif et ce qui ne l'est pas. Les modèles en Géographie, plus particulièrement ceux qui portent sur les systèmes de villes qui sont des systèmes complexes et ont de ce fait une part d'imprédictibilité, ne visent pas (toujours ou seulement) à reproduire l'existant, qui est seulement une des possibilités issues des configurations initiales pour laquelle l'histoire et l'aléatoire ont pu compter. Les modèles en

Géographie sont donc rarement déterministes. Ils visent plus à produire des configurations « crédibles », à comprendre les structures fondamentales du réel, qu'à restituer une image exacte du réel.

Cette modélisation des systèmes complexes comme les systèmes de villes s'avère particulièrement difficile à réaliser et à évaluer. En effet, il est difficile de valider les règles et mécanismes modélisés, car différents processus peuvent aboutir au même résultat. C'est le problème de l'*equifinality* relevé par Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1968). Par ailleurs, les trajectoires peuvent être différentes avec pourtant des points de départ semblables. Les structures sont aisément observables, mais les processus beaucoup plus difficilement.

Face à ces difficultés, il est nécessaire d'adopter une démarche empreinte de (Pumain, 2020) :

- *Parsimony* : on part du modèle le plus simple que l'on complexifie peu à peu pour estimer l'effet de chaque mécanisme et hypothèse théorique. Cette démarche permet de voir ce qui est « nécessaire ou pas ».

- *Multiplicity* : la complexité des interactions urbaines et leur contingence invitent à explorer l'espace des possibles en changeant les paramètres de modélisation, ce qui permet en outre de voir leur poids respectif.

Pour la *parsimony* et la *multiplicity*, la simulation informatique, l'*Extensive exploration*, est le moyen privilégié. En effet, l'augmentation de la puissance de calcul permet aujourd'hui l'exploration dans un « laboratoire virtuel » (Pumain, Reuillon, 2017) qui est une forme d'expérimentation. En modifiant les paramètres de simulation, on peut avec les modèles de simulation « rejouer l'histoire », voir à quelles conditions on obtient des configurations crédibles, voir la variété des configurations possibles, étudier le poids de chaque paramètre ou processus. En un mot, être dans une logique explicative et de compréhension. Il est important de préciser que les modèles étant non déterministes, la répétition des simulations est vitale afin de mesurer la « stabilité » des résultats. Énormément de travaux, notamment ces 20 dernières années, ont adopté cette démarche modélisatrice pour expliquer la croissance des systèmes de villes comme évoqué ci-dessous.

## 1.5 État de l'art sur l'émergence et l'évolution des systèmes de villes

L'organisation hiérarchique des systèmes de villes est un constat déjà ancien. Les premières études ont davantage été descriptives qu'explicatives, à l'image des travaux statistiques de Pareto (Pareto, 1896) et Zipf (Zipf, 1949), même si ce dernier évoque, sans les préciser, des forces de concentration et de dispersion à l'origine de la hiérarchie urbaine. De nombreux autres travaux, de géographes et économistes notamment, ont ensuite été produits pour comprendre la croissance urbaine. Dans ce paragraphe, nous ne tenterons pas une impossible synthèse de ces travaux, mais pointerons leur logique, les avancées permises et leurs limites pour mieux positionner par la suite nos travaux.

Cet état de l'art est notamment basé sur l'article de Dimou et Schaffar (Dimou, Schaffar, 2011) qui examine la relation entre la croissance démographique d'une ville et la taille de sa population, synonyme du volume d'externalités positives ou négatives présentes.

Seront vues successivement :

- les approches de la croissance aléatoire selon lesquelles la croissance des villes est indépendante de leur taille,
- les approches de la croissance déterministe où les effets d'agglomération conditionnent le processus de changement démographique urbain,

- les approches dites hybrides qui cherchent à combiner effets de taille et chocs exogènes aléatoires. Ces approches nous permettront d'introduire la modélisation Multi-Agents et les modèles dynamiques d'évolution des systèmes de villes.

### 1.5.1 Les théories de la croissance aléatoire

Le pionnier de la théorie de la croissance aléatoire est Gibrat (Gibrat, 1933). Il a développé un modèle statistique visant à montrer que les villes sont le produit d'un processus stochastique de répartition de la croissance de la population qui aboutit à une distribution hiérarchique des villes. Cette hiérarchie serait donc un « fait trivial ». La « loi de Gibrat » peut se résumer comme suit : la taille des villes est fonction d'une croissance fluctuante et aléatoire, caractérisée par une succession de chocs indépendants et identiquement distribués, et qui ne converge pas vers une distribution limite finie. Dans le modèle, les villes de taille différente affichent une espérance de taux de croissance avec la même valeur, et les taux de croissance des villes, à une époque donnée, sont indépendants des taux de croissance enregistrés au cours des périodes précédentes. Formellement :

- Le temps est divisé en intervalles courts,
- Au cours de chaque intervalle de temps, un objet (une ville) s'accroît d'une quantité  $p$ , par rapport à sa taille  $P$ , et qui est en moyenne proportionnelle à cette taille (cette règle équivaut à dire que le taux de variation  $tv=p/P$  est en moyenne constant pour tous les objets, avec une certaine variance),
- Les taux de croissance  $tv$  sont distribués aléatoirement, et plus précisément de façon indépendante de la taille des objets, ils ne sont pas non plus corrélés d'une période à une autre.

Avec ce modèle, Gibrat « a démontré qu'un ensemble d'objets de taille quelconque, soumis à un processus de croissance aléatoire, mais obéissant à la règle de proportionnalité entre la taille des objets et leur accroissement, avait nécessairement en fin de processus une distribution hiérarchique de la taille des objets » (Pumain, Saint-Julien, 2010).

Pour Gibrat, la distribution hiérarchique de la taille des villes s'explique donc par une « loi d'effet proportionnel ». La variation venant de variables aléatoires indépendantes de la taille des villes. Les économies d'agglomérations ne jouent donc pas de rôle explicatif dans l'inégalité de la croissance urbaine.

Si le modèle est « simple », il a néanmoins le mérite d'avoir été l'un des premiers à poser les bases d'une explication à l'émergence et de l'omniprésence de la hiérarchie urbaine en ne se contentant pas de la décrire.

En 1999, Gabaix (Gabaix, 1999a ; 1999b) reprend la logique générale du modèle de Gibrat à savoir que le changement de taille des villes suit un processus stochastique (toutes les villes ont la même espérance et variance de taux de croissance), pour développer un modèle de croissance urbaine sur une base plus économique en s'intéressant à la mobilité des individus. Ce modèle conduit à une distribution rang-taille des villes qui converge vers la loi de Zipf.

L'échantillon de villes est caractérisé par une population totale croissante. La mobilité du travail est réduite aux jeunes ménages qui ne peuvent migrer qu'une seule fois, au début de leur entrée dans la vie professionnelle. Leur choix de localisation est donc définitif. Les choix de migration à chaque période dépendent de « chocs exogènes » distribués de façon aléatoire. Ces chocs exogènes sont de multiples natures : « événement historique ou naturel (tels que des guerres et des bombardements, des catastrophes naturelles et des épidémies, voire, dans les pays en

développement, des mauvaises récoltes conduisant à des disettes et des famines ». Ces chocs peuvent aussi correspondre aux conséquences des politiques économiques locales, à la présence d'infrastructures, de services municipaux, à l'imposition, à la qualité de vie en général. Enfin, la production ne dépend que du facteur travail. Sous ces hypothèses, la croissance urbaine apparaît comme une marche aléatoire qui dépend uniquement des mouvements migratoires des jeunes agents économiques et aboutit à une distribution rang-taille des villes.

Synthétiquement, les critiques de ces modèles aléatoires portent sur le fait que l'observation empirique montre que leurs hypothèses de bases ne sont pas vérifiées. En effet, la croissance n'est pas indépendante de la taille des villes et les croissances au temps  $t$  sont corrélées à celle au temps  $t-1$ . Ces modèles peuvent donc jouer le rôle de filtre, de référence, mais ils ne permettent pas d'expliquer la hiérarchie urbaine, leur background conceptuel ne correspondant pas à la réalité. On retrouve ici le fait énoncé précédemment qu'une structure correspondant à une réalité peut être issue de processus qui ne sont pas ceux du réel.

### 1.5.2 Les théories de la croissance déterministe

Dans cette approche, ce sont les externalités d'agglomération qui conditionnent la croissance urbaine. Les productions et spécialisations de la ville, leurs caractéristiques propres vont influencer la migration résidentielle et donc la croissance démographique. On présuppose donc l'hétérogénéité urbaine, c'est-à-dire que les villes se différencient par un certain nombre de caractéristiques économiques, naturelles ou historiques (Schaffar, 2009).

Ce sont les attributs dits « de première et seconde nature » (Cronon, 1991 ; Krugman, 1993), qui différencient les villes et expliquent leur localisation et leur croissance.

- Les attributs de première nature expliquent essentiellement la localisation des villes :

Ils tiennent aux avantages naturels liés à la présence de terres fertiles, de ressources singulières (matières premières), à un climat favorable à certaines activités, etc. Ils sont aussi liés aux localisations qui vont définir l'accessibilité des lieux et leurs avantages comparatifs : localisation par rapport au relief (localisation sur un col, un piémont), proximité aux voies navigables, mais aussi place dans les réseaux de transport. Krugman (1996) est l'un des premiers à intégrer dans des modèles économiques l'hétérogénéité de l'espace et à mettre en avant le fait que les attributs de première nature permettent une meilleure accessibilité et peuvent favoriser les effets d'agglomération. Toutes les villes n'ont pas les mêmes caractéristiques initiales concernant l'accessibilité aux voies de communication et donc aux ressources localisées. L'accessibilité correspondant à la quantité de ressource accessible depuis une localisation donnée, en un temps donné, avec un mode de transport donné (Handy, Niemeier, 1997). Pour Krugman, la taille des villes va donc être conditionnée par leur importance en tant que nœud d'interconnexion dans le réseau urbain régional ou national. Behrens reprend la même logique, mais en mettant davantage l'accent sur le rôle des différents modes de transport et les inégalités conséquentes d'accessibilité (Behrens, 2007).

- Les attributs de seconde nature :

Si les attributs de première nature sont supposés expliquer essentiellement la localisation (plus ou moins stratégique) des villes, les attributs de « seconde nature » se veulent eux plus explicatifs de la croissance urbaine. Ils regroupent les avantages induits par les interactions issues de la concentration des activités économiques du même secteur ou pas : les externalités d'agglomération (Marshall, 1890).

La concentration d'activités économiques va en effet permettre une meilleure productivité en favorisant une meilleure adéquation entre le marché du travail et le marché de l'emploi, aux entreprises de partager des infrastructures ayant des coûts fixes élevés, des fournisseurs

spécialisés, d'avoir de plus larges débouchés, de favoriser la diffusion des savoirs, des idées nouvelles et des technologies pour, *in fine*, favoriser l'innovation.

Sur la base de la théorie des externalités d'agglomération existent :

- des modèles d'économies géographiques expliquant l'agglomération des agents et des activités économiques dans les villes par les coûts et les avantages qui y sont liés (Arthur, 1989 ; Krugman, 1991 ; Fujita et Krugman, 1995 ; Fujita *et al.* 1999 ; Combes *et al.* 2006 ; Behrens, 2007).

- des modèles, inspirés des travaux d'Henderson (Henderson, 1974, 1988), qui travaillent sur la question de la taille optimale des villes (Prud'homme, Lee, 1999) et d'une ville au sein d'un système de villes en concurrence. On cherche un équilibre entre des forces centripètes et centrifuges représentées respectivement par les économies d'agglomération et les coûts de transport.

Dans les théories de la croissance déterministe, l'émergence et la croissance des villes vont donc dépendre des attributs de première nature et seconde nature. Les villes vont se localiser et prospérer là où c'est le plus profitable.

Les critiques des modèles économiques portent sur le fait, qu'à la recherche d'équilibres, ils ont longtemps négligé l'hétérogénéité de l'espace, que la présence d'avantages de première nature n'est pas toujours vérifiée (certaines grandes métropoles ont émergé et prospéré sans jouir de ces avantages géographiques initiaux) et qu'expliquer l'agglomération par les avantages que produit l'agglomération est un raisonnement tautologique (Pumain, 1997). Elles portent aussi sur l'aspect statique de l'approche et sur le fait que s'il est indéniable qu'il existe des économies d'agglomération, leur mesure demeure très problématique.

Ainsi, les modèles économiques ne permettent pas d'expliquer à la fois l'émergence des villes et leur croissance différenciée dans un système de ville, notamment parce qu'ils ne traitent pas suffisamment des interactions spatiales et des processus de coproduction système de villes-système de transport qui est en général considéré comme une donnée fixe dans sa configuration et ses attributs (vitesse de déplacement).

Depuis quelques années, on assiste à l'essor d'une approche « hybride » (Dimou, Schaffar, 2011) qui vise à concilier théorie de la croissance aléatoire et déterministe, en prenant en compte les effets d'agglomération et en intégrant des événements aléatoires (Nicolas, Radeff, 2012).

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont une base pour cette approche. Il n'est pas possible de réaliser des expériences à l'échelle humaine (cf. 1.4) par respect de l'éthique, parce que les évolutions se font en général dans le temps long et par l'impossibilité de contrôler tous les paramètres de l'expérience. Aussi, la volonté de comprendre la dynamique des systèmes de villes ne peut passer que par une approche modélisatrice.

Les Systèmes Multi-Agents, couplés à une puissance de calcul toujours croissante des ordinateurs, apparaissent particulièrement adaptés à la modélisation des systèmes complexes que sont les systèmes de villes, car ils mettent en relation « les comportements individuels et les phénomènes observés au niveau global » (Ferber, 1995), ils permettent d'intégrer à la fois des processus déterministes et aléatoires dans une approche résolument dynamique des systèmes de villes.

Après avoir introduit la notion de Systèmes Multi-Agents, nous présenterons les principaux modèles y ayant recours relevant de l'approche « hybride » qui traitent des systèmes de peuplement.

### 1.5.3 Les modèles dynamiques basés sur la modélisation Multi-Agents

Après avoir défini ce qu'est la modélisation Multi-Agents, nous étudierons son apport dans l'étude et la compréhension de l'évolution des systèmes de villes. Ce tour d'horizon permettra de poser un bilan global des principales études réalisées et des points qui restent à étudier afin de clarifier notre positionnement théorique et méthodologique.

#### 1.5.3.1 Les systèmes Multi-Agents

Un système Multi-Agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents (des individus, des voitures, des villes, etc.), situés dans un environnement et qui interagissent entre eux et avec l'environnement en suivant un ensemble de règles. Ils sont partiellement autonomes dans la limite fixée par le modélisateur. Plus précisément, pour Ferber (1995), un agent est une entité physique ou virtuelle :

1. Qui est capable d'agir dans un environnement,
2. Qui peut interagir directement avec d'autres agents,
3. Qui est mû par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'il cherche à optimiser),
4. Qui possède des ressources propres,
5. Qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement. Il ne peut connaître les actions d'un agent « éloigné » ou de nature différente. Un agent représentant la « population » n'a pas forcément connaissance des actions prises par l'agent « ville » qui n'est pas à la même échelle d'action,
6. Qui ne dispose que d'une vision partielle du système, il n'a pas connaissance de l'ensemble des mécaniques et processus en jeux. Il ne connaît que partiellement les actions réalisées par les autres agents,
7. Qui possède des compétences et offre des services,
8. Qui peut éventuellement se reproduire.

Le comportement de l'agent vise donc à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des informations qu'il reçoit. Dans un modèle SMA de trafic routier par exemple, un individu (agent) va effectuer des choix d'itinéraires, de mode de transport, d'horaires, etc. de façon à réduire son temps de transport tout en réalisant le programme d'activités qu'il s'est fixé, en tenant compte des autres agents avec qui il interagit. L'agent automobiliste n'est pas seul, et de ses interactions avec les autres peuvent naître des bouchons qui vont le pousser à s'adapter, après un jeu d'essais-erreurs, en changeant par exemple de mode de transport ou de routes (MatSim, 2016).

Les agents peuvent donc relativement bien reproduire le comportement autonome de l'Homme. Ils sont libres de leurs actions dans le cadre des règles d'interactions et des propriétés que leur donne le modélisateur. Au cours de leur « vie », ces agents vont être capables d'échanger avec d'autres agents, d'agir sur leur environnement et de le modifier. Ce sont eux qui font émerger des formes d'organisation par leurs interactions à l'échelle micro, qui sont elles-mêmes dépendantes des caractéristiques et contraintes exercées, imposées par le système et son environnement. Dans un SMA, les agents sont localisés et l'environnement dispose généralement d'une métrique (une forme de distance), ce qui confère une dimension géographique certaine à la modélisation.

### ***1.5.3.2 Les SMA pour étudier l'émergence et la croissance des systèmes de villes***

Les villes sont des entités qui interagissent entre elles au sein de systèmes de villes. Ces interactions se matérialisent par des flux, notamment d'individus qui migrent d'une ville à l'autre. Les choix de destination dépendent des caractéristiques des individus et de leur stratégie individuelle. Le flux d'une ville  $i$  à une ville  $j$  peut donc être composé d'individus aux ressorts différents. Aborder les flux à l'échelle désagrégée apparaît donc particulièrement important.

Les systèmes de villes se caractérisent par des processus de coévolution et d'auto-organisation puisque leur dynamique propre dépend de celle des autres et que ces dynamiques relatives conditionnent les choix individuels. Le système de villes est ainsi en constante évolution, au regard des croissances relatives qui peuvent redéfinir les attractivités relatives, mais aussi parce que les conditions des interactions évoluent et redéfinissent là encore les attractivités relatives. Une nouvelle infrastructure de transport, une accélération des vitesses de déplacement reformatent par exemple l'accessibilité relative des villes et donc leur attractivité.

Les SMA permettent de simuler les interactions entre agents à l'échelle individuelle, d'avoir une approche dynamique capable d'appréhender les processus d'auto-organisation (de faire en sorte que les conditions des interactions changent en fonction de ce qui s'est produit précédemment et des ordres macroscopiques qui peuvent émerger des interactions individuelles), ce que ne permettent pas les modèles basés sur des équations différentielles qui ont été les premiers à aborder la dynamique des systèmes de villes (Allen, Sanglier, 1979 ; Forrester, 1969 ; Weidlich, Haag, 1988). Comme les SMA permettent une approche spatiale (les agents sont localisés, l'environnement a une métrique), ils constituent un type de modélisation particulièrement bien adapté pour simuler l'émergence et l'évolution des systèmes de villes. En tant que laboratoire virtuel, ils permettent l'expérimentation, de modifier les paramètres de modélisation, par exemple ceux conditionnant les interactions, pour en mesurer le poids respectif (Raimbault, 2018). Ils permettent de voir si, à partir d'un jeu plus ou moins important de règles, il est possible de produire des structures spatio-temporelles proches de celles observées pour les systèmes de villes. Les SMA rendent donc possible « une réflexion sur les processus à la base du changement urbain, sur les interrelations entre les comportements des acteurs et les transformations des configurations spatiales » (Sanders, 2006).

Cette opportunité d'utiliser les SMA pour mieux comprendre les systèmes de villes, et plus particulièrement leur coévolution avec les réseaux de transport (Raimbault, 2018), s'étant concrètement réalisée avec le développement de la puissance de calcul des ordinateurs depuis une vingtaine d'années, il n'est pas surprenant que de nombreux modèles aient vu le jour.

### **1.5.4 Tour d'horizon des modèles dynamiques d'évolution des systèmes de villes**

Nous allons effectuer un tour d'horizon rapide des modèles SMA visant à étudier l'évolution de l'organisation spatiale des sociétés face aux contraintes environnementales et l'évolution des systèmes de villes. Ce tour d'horizon repose en grande partie sur l'article (Schmitt, Pumain, 2013) et la thèse de Clara Schmitt (Schmitt, 2014). Seront d'abord présentés les premiers modèles SMA qui visaient à rendre compte de l'évolution de sociétés historiques dans un territoire déterminé (Sugarscape, ENKIMDU et le modèle Village), puis nous présenterons plus en détail la « famille » des modèles issus du projet Simpop qui sont les modèles les plus aboutis pour traiter des évolutions des systèmes de villes (Simpop, EUROSIM, SimpopLocal, SimpopNet).

- Le modèle Sugarscape (Epstein; Axtell 1996) :

Ce modèle simule la production inégalitaire d'une ressource alimentaire (du sucre) dans un environnement. L'une des hypothèses du modèle est que la présence de la ressource alimentaire et son rendement sont explicatifs des inégales croissances urbaines entre les villes. Chaque cellule de l'espace modélisé produit une quantité de sucre définie à chaque itération et possède une capacité maximale de production. Cette production est continue et spontanée. Les agents explorent leur environnement et ramassent le sucre. Ils ne se déplacent pas tant que la cellule sur laquelle ils sont localisés est plus rentable que celles présentes dans leur champ de vision. Ils peuvent constituer des réserves et consomment régulièrement du sucre.

Ce modèle très théorique et imagé constitue un des tout premiers qui, avec une approche SMA, permet de faire émerger de façon dynamique des agglomérations de population et de richesse de tailles différentes.

- Le modèle ENKIMDU du MASS project (Wilkinson *et al.* 2007) :

L'enjeu de ce modèle est de reconstruire le paysage socio-environnemental de la Mésopotamie de l'âge de Bronze. Il tente d'expliquer la dynamique du système de peuplement dans différentes régions. Ce modèle repose aussi sur une solide base de données historiques. La position de ENKIMDU est qu'il faut se concentrer sur l'interface homme-environnement afin de comprendre leurs influences mutuelles et les dynamiques du peuplement. Le modèle permet de simuler la réaction de la société (un ensemble d'agents) face à des événements imprévus (famine par exemple) et de voir comment elle y fait face. Il est composé de 5 sous-modèles: un modèle qui simule les dynamiques météorologiques, un modèle agronomique, un modèle de gestion des troupeaux, un modèle de dynamiques démographiques des sociétés humaines, un modèle de comportement individuel (pratiques agricoles, mariages, héritages, échanges et commerces, etc.). En fonction de leurs caractéristiques, de leur stratégie, des caractéristiques de l'environnement, les agents vont se comporter différemment face à différents stimulus, pouvant s'apparenter aux chocs aléatoires de l'approche stochastique (cf. 1.5.1), ils vont potentiellement changer d'activité, de localisation. Le modèle permet donc de voir la réponse en termes d'organisation « spatiale » d'une « société » face à différents stimuli. Conceptuellement intéressant, ce modèle ne permet toutefois pas de traiter de la croissance des systèmes de villes, en particulier aux périodes contemporaines.

- Le modèle Village du Village Ecodynamics project (Kohler, Johnson *et al.* 2007) :

L'enjeu du modèle est de comprendre et d'étudier la coévolution entre une société d'agriculteurs et son environnement dans la région de Mesa Verde. Ce modèle repose aussi sur une base de données historique très complète. Il fait suite à un travail d'exploration des données (concernant 700 ans d'histoire). Le modèle Village est un SMA qui sert aussi à traiter de la question de la localisation des habitats et de leur impact sur l'environnement. Il tente d'expliquer les dynamiques démographiques, les questions de localisation et d'agrégation des foyers à partir de mécanismes simulant des comportements sociaux et leurs impacts. Ce modèle prend en compte le fait que le déterminisme environnemental ne suffit pas à expliquer l'organisation des sociétés. Il faut prendre en compte la capacité que la société a pour s'adapter à son environnement (innovation, organisation, etc.). De fait, ce modèle a la volonté de comprendre et d'expliquer les mouvements des hameaux vers les villages ou centres communautaires plus grands. C'est un modèle qui repose sur 4 sous-modèles pour simuler la dynamique environnementale : potentiel de production de maïs, estimation de la disponibilité en eau, dynamique de population de 3 espèces de gibiers en fonction de leur environnement, production de la ressource en bois. Il

repose aussi sur la mobilité et la relative liberté d'interagir et de choisir leurs stratégies pour les individus et les ménages. Ils sont ainsi capables de changer la localisation de leur habitat d'une année sur l'autre, d'échanger des surplus avec la possibilité de choisir les agents les plus coopératifs et d'avoir recours à différents « réseaux sociaux » pour y parvenir. Tout comme pour le modèle ENKIMDU, il permet d'étudier l'évolution de l'organisation « spatiale » d'une société par rapport à l'évolution de son environnement.

Si les modèles Multi-Agents Sugarscape, ENKIMDU et Village sont intéressants par leur antériorité, par leurs innovations en termes de formalisation des comportements des agents et leurs capacités à montrer des processus d'auto-organisation dans la distribution du peuplement, ils ne traitent toutefois pas à proprement parler de l'émergence de systèmes de villes hiérarchisés, en particulier dans l'économie non agricole. En cette matière, le travail le plus fourni est le plus performant est assurément à mettre au crédit de l'équipe P.A.R.I.S. de l'UMR Géographie-cités qui, depuis plus de 20 ans, développe les modèles de la famille Simpop<sup>2</sup> que nous allons détailler ci-dessous.

- La famille Simpop de l'équipe P.A.R.I.S. de l'UMR Géographie-cités :

Les modèles Simpop (Pumain, 2012a) sont bâtis sur les hypothèses de la théorie évolutive des villes proposée par Pumain et qui vise à comprendre les systèmes de villes comme des systèmes d'agents adaptatifs en coévolution, aux interactions multiples, avec différents aspects mit en valeur en particulier l'importance de la diffusion des innovations. Le but est de « simuler le passage d'un peuplement distribué en villages à un système hiérarchisé de villes » en mettant en évidence les paramètres qui rendent compte de la concentration progressive de la population dans les agglomérations de plus en plus grandes au profil économique diversifié. Les modèles visent plus particulièrement à mieux cerner le rôle des processus de diffusion de l'innovation dans le développement des systèmes de villes.

Les grands principes du SMA Simpop (Sanders *et al.* 1997) sont les suivants. Les établissements humains sont au départ des villages dédiés uniquement à la production agricole. Ils sont caractérisés par leur population et leur richesse. Le modèle est structuré en une grille hexagonale représentant des lieux potentiels de peuplement avec des capitaux et potentiels de ressources disponibles inégaux. Certains lieux vont être considérés comme non adaptés à l'implantation d'une ville et ne seront pas aménagés. Sur cette grille sera distribué le semis de peuplement par tirage aléatoire dans une loi normale constituant ainsi les agents « villes ». Ils ne sont encore que des « villages » avec des populations et niveaux de richesses différents avec pour seule fonction la production agricole. Au cours du temps, ces villages peuvent se doter de nouvelles fonctions (commerce, administration, industrie d'extraction ou de transformation) et ainsi devenir des villes (dont une des caractéristiques est l'existence de diverses fonctions non agricoles). L'apparition de nouvelles fonctions dans une ville va se faire lorsque certains seuils de population et richesses sont franchis. Eu égard à leurs fonctions et à leur niveau de population, les villes produisent différents types de biens. Les surplus de production sont échangés entre les villes sur des marchés décentralisés par l'intermédiaire d'interactions spatiales. Ces échanges sont nécessaires, car on ne produit pas de tout partout et parce qu'il s'agit de satisfaire les demandes locales qui peuvent porter sur des produits qui n'existent pas localement. Les interactions spatiales dépendent de la distance entre les villes (plus les villes sont éloignées, plus l'échange est faible). Au fil du temps, les populations évoluent selon la richesse après échanges et le niveau de satisfaction de la demande.

Le premier modèle Simpop a permis de simuler l'évolution d'un système urbain de manière stylisée. Le modèle Simpop2 qui l'a suivi (Bretagnolle, Daudé, Pumain, 2006 ; Pumain, 2008)

<sup>2</sup> <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr/>

perfectionne l'approche en permettant notamment d'inclure les cycles d'innovation et le rôle des limites administratives dans les échanges. Appliqué sur de longues échelles de temps pour l'Europe et pour les États-Unis (Bretagnolle, Pumain, 2010), il donne des résultats satisfaisants en permettant de produire des systèmes urbains « crédibles » montrant des différences structurelles pour les deux continents.

Le modèle Eurosim (Sanders et al, 2007) fait suite aux travaux de Simpop, mais avec la volonté de simuler sur une période de temps plus réduite (une centaine d'années), l'évolution du système des villes européennes d'ici 2050. Tout comme dans le modèle Simpop, les agents sont des villes. Elles sont caractérisées par : leurs fonctions urbaines, leur population, leur richesse, le nombre d'actifs travaillant dans chacune des fonctions de la ville. Ensuite, les activités des villes sont de produire, échanger et consommer. Leurs interactions est fonction de leur relation de proximité, de leurs fonctions urbaines et leur complémentarité. Ainsi, la capitale administrative d'un pays à une plus grande portée d'interaction qu'une petite ville agricole de l'arrière-pays. Les gens sont prêts à se déplacer sur de grandes distances afin d'échanger avec la capitale administrative. La croissance des villes dépend alors de l'innovation et de leur réussite sur le marché global. Ce modèle étudie les influences mutuelles des villes en fonction de leurs spécialisations, de leur position relative dans le système, mais aussi des changements structurels. Il montre comment le système de villes se structure et s'organise spatialement dans le temps à partir des interactions.

Le modèle SimpopLocal (Schmitt, 2014) a lui été développé dans la perspective d'étudier l'émergence des motifs initiaux d'établissement d'individus. Il simule la croissance de 100 « points de peuplement » qui correspondent à des groupes d'agriculteurs sédentarisés. Ce sont les agents du modèle. Le modèle a pour vocation d'« étudier l'émergence de la structuration et de la hiérarchisation d'un système de peuplement en simulant les dynamiques de croissance de points de peuplement dont le développement est entravé par de fortes contraintes locales et environnementales, mais qui sont progressivement repoussées grâce à l'adoption d'innovation » (Schmitt, 2014). Chacun de ces points de peuplement a pour variables : une localisation, une taille de population, une quantité de ressources disponibles dans son environnement local. La croissance de chacun est fonction des contraintes locales, de l'innovation, et de sa diffusion. Une innovation a une plus grande probabilité d'émerger dans les principaux points de peuplement. Une fois produite, elle va se diffuser aux autres points de peuplement en fonction de leur distance. Les innovations améliorent la croissance démographique des villes. On est dans une approche déterministe de la croissance avec une réduction du nombre de mécanismes et de règles de simulation.

Le modèle SimpopNet (Schmitt, 2014) n'est pas une « simple évolution » des modèles Simpop. En effet, il représente une rupture en cherchant à intégrer les processus de coévolution entre le réseau de transport et le système de villes sur la période 1800-2000. Jusqu'à SimpopNet, les conditions de l'interaction entre les villes sont fixes. Avec SimpopNet le réseau de transport va évoluer conjointement aux systèmes de villes. De nouvelles infrastructures de transport vont apparaître au fil du temps. Les liens créés au temps  $t$  (liens « innovants ») vont permettre des déplacements à une vitesse plus rapide qui dépend des technologies de transport de l'époque  $t$ . Ces liens relient les villes considérées comme des nœuds d'un graphe et ont donc des caractéristiques différentes en termes de vitesse. Ces nouvelles infrastructures vont relier en priorité les plus grandes villes et celles avec qui elles interagissent le plus, mais pour lesquelles le réseau présente des « faiblesses ». Ces nouveaux liens vont ainsi renforcer le potentiel d'interaction, l'accessibilité des villes nouvellement connectées et, par conséquent, leur attractivité et *in fine* leur croissance. Ainsi, une des grandes hypothèses de ce modèle est que « les villes les plus accessibles sont celles dont les échanges sont les plus facilités. Or, les échanges et les interactions sont à l'origine des dynamiques d'innovations et sont eux-mêmes les

moteurs de la croissance urbaine » (Schmitt, 2014). Les nouveaux liens, qui relient prioritairement les plus grandes villes et celles avec qui elles interagissent dans des conditions « insatisfaisantes », eu égard aux caractéristiques du réseau de transport, entraînent un changement dans les conditions de l'interaction. On observe au fil de la simulation, une tendance à indurer les structures qui émergent, avec un renforcement des hiérarchies. Cette logique de renforcement étant peu ou prou la même que celle développée par Baptiste (Baptiste, 1999) qui montre les processus de renforcement mutuel entre réseau de transport et villes.

Raimbault (Raimbault, 2018), dans sa thèse sur la caractérisation et la modélisation de la coévolution des réseaux de transport et des territoires, a repris les principes et algorithmes fondamentaux du modèle Simpop et SimpopNet pour l'explorer plus profondément et systématiquement, avec toutefois des modifications concernant le développement du réseau de transport. Ainsi, à l'état initial, un nombre de villes fixé à l'avance est réparti uniformément. Une distance minimale est respectée entre chaque ville et leur population est distribuée selon une loi rang-taille. Sur cette configuration, un réseau va être créé en connectant les villes deux par deux avec une logique de plus proche voisin. Des clusters sélectionnés aléatoirement seront connectés perpendiculairement au lien le plus proche en dehors de celui-ci. D'autres traitements visant à créer des raccourcis vers les plus grandes villes et à planariser le réseau sont aussi effectués.

Différents jeux de paramètres de modélisation ont été utilisés afin de tester leurs effets sur les systèmes de villes obtenus, sur leurs trajectoires temporelles et plus largement pour mieux comprendre la coévolution des systèmes de villes et des systèmes de transport les liant.

### **1.5.5 Catégorisation des modèles dynamiques d'évolution des systèmes de villes basés sur la modélisation Multi-Agents**

Bien que tous les modèles dynamiques vus précédemment soient basés sur une logique Multi-Agents, il est difficile de les évaluer, car tous n'ont pas la même finalité et ne relèvent pas de la même logique de conception. Toutefois, dans le paragraphe qui suit, nous avons cherché à catégoriser ces modèles pour, dans un second temps, être en mesure de mieux positionner notre travail par rapport à l'existant.

Banos et Sanders (Banos, Sanders, 2012) ont proposé une catégorisation des modèles selon deux dimensions :

1. Selon le degré d'abstraction du phénomène empirique représenté par le modèle. C'est l'opposition entre les modèles *data-driven* (guidés par les données), et les modèles *concept-driven* ou « stylisés », reproduisant des mécanismes plus généraux. Les premiers reposent alors sur des données empiriques comme point de départ.
2. Selon le dispositif que le modélisateur met en place. C'est-à-dire le niveau de simplification du processus modélisé. On assiste à une opposition entre les modèles préconisant le principe de parcimonie, les modèles KISS (*Keep it Simple, Stupid !*) (Axelrod, 1997), ou ceux qui ont pour but de simuler au plus près la réalité en intégrant de nombreuses variables, les modèles KIDS (*Keep It Descriptive, Stupid !*) (Edmonds, Moss, 2005). Une démarche KISS permet notamment d'isoler plus facilement chaque paramètre.

Du côté KISS se trouve donc les modèles théoriques qui visent essentiellement à la compréhension, à cerner le poids des différents processus et paramètres, plus qu'à reproduire en détail le réel, même si on souhaite s'en approcher au moins dans ses logiques. Les hypothèses théoriques sont fortes, mais doivent rester peu nombreuses. C'est le principe de parcimonie. On cherche à limiter le nombre de mécanismes et de paramètres du modèle pour le garder « maîtrisable ».

La seconde grande catégorie KIDS comprend les modélisations descriptives et appliquées. Elles reposent sur des données empiriques détaillées et cherchent à reproduire la complexité d'un phénomène avec de nombreux paramètres. Les modèles concernés sur la figure ci-dessous sont The Village Project, ENKIMDU et EUROSIM. Le problème est qu'ils ne sont valables que pour une période ou région donnée et ne permettent que difficilement la généralisation et la recherche de loi.

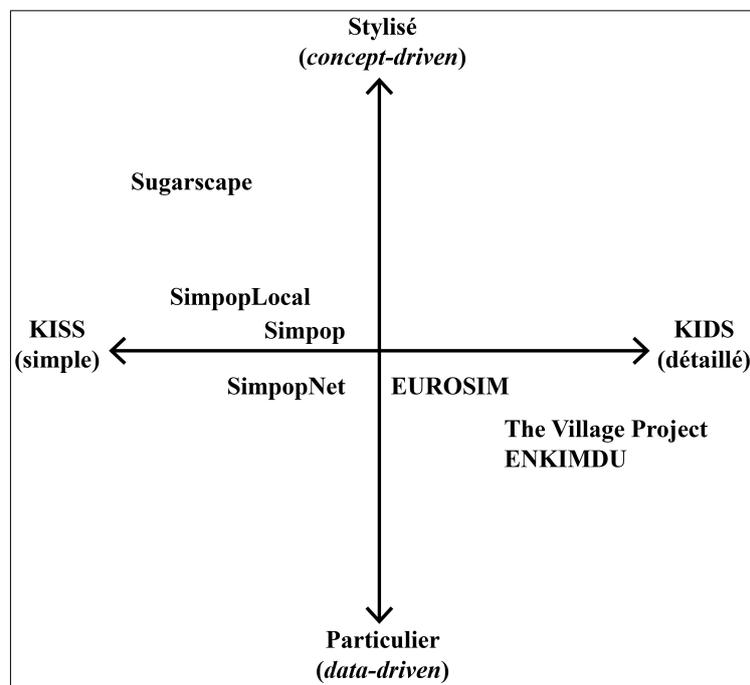


Figure 4: Classification des approches de modélisation des modèles présentés (selon la classification de Schmitt et Pumain (Schmitt, Pumain, 2013))

Chaque approche de modélisation répond à un besoin. Pour certains modélisateurs, il va s'agir de saisir le fonctionnement des systèmes de villes avec le moins d'hypothèses et données possibles. D'autres vont faire un focus sur les effets particuliers d'un ou plusieurs paramètres sur les mécanismes d'évolution du système en se basant sur de nombreuses données empiriques. Aussi, ce sont les hypothèses et objectifs de modélisation qui vont influencer le choix de l'approche à adopter.

Le tableau ci-dessous permet une comparaison des modèles en fonction de points jugés discriminants pour l'étude de l'émergence et l'évolution des systèmes de villes. Cette comparaison va servir à comprendre ce qui a été fait dans l'étude de l'évolution des systèmes de ville par les SMA. Cette comparaison se fait par le prisme des interactions et par la possibilité du modèle à traiter de l'émergence de nouvelles villes. Il est alors possible de savoir quel aspect de l'étude de l'évolution des villes a été traité et de quelle manière. Tout d'abord, nous différencions les modèles selon :

- S'ils intègrent la ville en tant que telle comme une entité propre ou si elle n'est que l'agglomération d'entité individus,
- Si l'échelle individuelle est prise en compte ou si au contraire les interactions se produisent de ville à ville.

- Si l'intensité des interactions entre les villes est conditionnée par la distance euclidienne ou une distance réseau, quelle qu'en soit l'unité : distance kilométrique, en temps, topologique. L'espace n'étant ni homogène ni isotrope, la prise en compte des réseaux de transport paraît essentielle pour mieux comprendre l'évolution des systèmes de villes,

- Si l'interaction entre les villes se fait par l'intermédiaire d'individus qui se déplacent concrètement d'une ville à l'autre ou si elle s'effectue sur des marchés décentralisés de manière instantanée, sans coût,

- Si, à l'état initial, les villes ont des tailles différentes ou pas, ce qui revient à observer le renforcement progressif de la hiérarchie ou à vouloir simuler son émergence puis son évolution,

- Si le nombre de villes modélisées est fixe ou évolutif, ce qui revient à traiter ou pas de la question de l'émergence des villes.

Dans la littérature, et plus particulièrement parmi les SMA présentés, peu modélisent et simulent réellement un système de villes et son réseau de transport en interaction. L'interaction entre villes se traduit par des flux de différentes natures, qui sont conditionnés par les distances réseau et l'attraction relative de chaque ville, sans pour autant prendre en compte les déplacements des individus. Or, l'interaction se produit par leur intermédiaire et la croissance urbaine est impactée par le jeu des migrations résidentielles. Les individus sont sensibles aux évolutions du système de villes qui modifient leurs stratégies économiques et résidentielles. Le tableau ci-dessous montre la difficulté des modèles à représenter cette interaction par l'intermédiaire des individus et la possibilité du système de faire émerger de nouvelles villes suite à ces interactions.

Modèles	Modélisation d'agent « Villes »	Modélisation d'agent « Individus »	Modélisation de réseau de transport	Interaction entre villes par des individus	Hiérarchie initiale	Émergence de nouvelles villes
Sugarscape		X				
ENKIMDU	X	X			X	X
The Village	X	X			X	X
Simpop	X					
EUROSIM	X		X		X	
SimpopLocal	X					
SimpopNet	X		X		X	

Tableau 1: Tableau de comparaison des SMA étudiant l'évolution du système de peuplement

On peut catégoriser les modèles dynamiques qui étudient les systèmes de villes et leur évolution à travers plusieurs critères. Il s'avère que les modèles existants couvrent de nombreux aspects primordiaux à l'étude des systèmes de villes. L'individu et l'espace sont au cœur des études. Pourtant, même si l'interaction est centrale, les modèles ne prennent pas en compte les individus en tant qu'agent de l'interaction. De plus, la majorité des systèmes étudiés sont fixes dans le temps, c'est-à-dire le phénomène d'émergence de nouvelles villes reste peu intégré à la modélisation.

### 1.5.6 Limites des modèles dynamiques des systèmes de villes

Les études menées jusqu'ici ont permis de mettre en évidence de nombreux mécanismes et facteurs explicatifs de l'évolution du système de villes. Toutefois, certains aspects n'ont pas assez été pris en compte ; le rôle de l'individu acteur de l'interaction, la modélisation de systèmes de villes non fixes dans lesquels de nouvelles villes peuvent émerger.

### ***1.5.6.1 Des modèles dynamiques de systèmes de villes aux hypothèses et paramètres (trop) nombreux ?***

Les modèles vus précédemment, en particulier ceux de la famille Simpop, ont permis de grandes avancées dans la compréhension de la structuration et de la dynamique des systèmes de villes en faisant notamment jouer un rôle déterminant à l'innovation et à sa diffusion. On notera toutefois que ces modèles s'éloignent assez largement d'une approche KISS. En effet, pour simuler des systèmes de villes crédibles, à partir de données empiriques ou pas, ils sont bâtis sur de nombreuses hypothèses, ils nécessitent le calibrage de nombreux paramètres, ce qui peut les rendre difficiles à appréhender et ce qui rend leurs résultats relativement difficiles à communiquer. Ainsi, les modèles font notamment de lourdes hypothèses sur l'émergence de l'innovation (où la faire émerger, à quelle fréquence ?), sur sa propagation dans la hiérarchie urbaine, sur ses effets sur l'attractivité relative des villes pour différentes catégories de population et *in fine* sur leur croissance démographique. Certes, des données historiques permettent de calibrer les modèles pour que les résultats correspondent le mieux possible aux données empiriques, mais cela ne dit rien de l'effectivité des processus modélisés, même s'ils s'appuient sur un solide corpus de connaissances géographiques bien maîtrisées. D'autres processus, d'autres logiques, plus simples peut-être, permettraient-ils d'aboutir à de semblables résultats ?

Les nombreuses hypothèses et paramètres mobilisés rendent par ailleurs difficile à cerner le poids de chacune et chacun. La fonction filtre dévolue aux modèles ne se réalise pas toujours. La question est donc ici de savoir ce que l'on gagne effectivement à intégrer un lourd background de connaissances géographiques, sur la diffusion des innovations et leurs effets, dans la modélisation des systèmes de villes. Y a-t-il moyen de faire plus simple, de se passer au maximum d'hypothèses, de limiter les paramètres utilisés pour modéliser les systèmes de villes à l'image des travaux de Gibrat ?

### ***1.5.6.2 Pour une approche individu-centrée***

Concrètement, les interactions entre les villes, qui assurent leur développement et leur persistance dans le temps en leur permettant de s'adapter, sont le fait d'individus qui vont aller de A à B temporairement pour échanger, et en retirer potentiellement un gain au sens large, ou définitivement pour s'y installer. Dans ce cas, un départ de population d'une ville  $i$  vers une ville  $j$  correspond donc à une diminution de la population de  $i$ , si ce départ n'est pas compensé par de la croissance endogène. Par ailleurs, les individus qui interagissent se déplacent sur des réseaux de transport qui permettent effectivement l'interaction. Ces déplacements vont avoir un coût plus ou moins élevé en fonction des facilités offertes par les réseaux de transport. Ce sont donc ces choix individuels de déplacement et de migration qui conditionnent la croissance allométrique des systèmes de villes. On peut considérer théoriquement que ces choix ont une grande composante rationnelle, l'Homme cherchant à maximiser son profit. L'individu va changer de ville si cela lui apporte un gain (que ce soit au niveau du confort de vie, de l'emploi, de l'offre culturelle, etc.). C'est globalement une « logique économique », rationnelle, qui prime. La composition de la ville et sa taille, qui permettent des économies d'agglomération plus ou moins fortes, vont définir leur attractivité.

Ainsi, l'interaction entre les villes se matérialise en priorité par des déplacements temporaires ou définitifs d'individus, qui se font sur des réseaux de transport anisotropiques et correspondent à une certaine rationalité des individus. Or, on constate que, dans les modèles existants, on traite bien de l'interaction, des échanges, mais ceux-ci ont lieu sur des « marchés dématérialisés », pas en des lieux concrets de l'espace géographique, pas sur les supports que sont les réseaux. Par

ailleurs, le plus souvent, l'individu est considéré comme rationnel. Il sait ce qu'il a à gagner en migrant de A à B. Il connaît les caractéristiques de chaque ville et base ses choix sur leur comparaison. Mais est-ce réellement le cas ? Cette rationalité et cette connaissance exhaustive ou même partielle sont-elles effectivement à l'œuvre ? On peut en douter, quand on voit par exemple la difficulté qu'ont même les chercheurs à rassembler des données comparatives de qualité sur les villes. D'autres motivations, d'autres logiques peuvent-elles exister dans les choix de migration (y compris l'aléatoire) et si tel est le cas, pour quels effets sur la croissance allométrique des systèmes de villes ?

On observe aussi que les modèles existants se situent systématiquement dans une perspective de croissance. Les villes interagissent, mais leur population ne diminue pas. Or, un départ net de population d'une ville  $i$  doit se traduire par une diminution de la population de  $i$ , si ce départ n'est pas compensé par de la croissance endogène.

Ainsi, il semble pertinent pour mieux comprendre les systèmes de villes de considérer les individus et leur motivation particulière en termes d'interaction, plutôt que d'avoir une approche agrégée. Cette dernière revient à considérer le flux d'une ville A à B comme un agrégat, ou même à considérer que les villes interagissent, mais « virtuellement », sans savoir où s'opèrent concrètement les interactions dans l'espace et pour quels effets. Or, cette approche individuelle reste peu présente dans les modélisations où l'agent est la ville (entité qui « n'existe pas en propre ») et non l'individu.

### ***1.5.6.3 La question de l'émergence des villes***

Dans la plupart des modèles, les simulations débutent avec un système de peuplement déjà hiérarchisé (même faiblement). Les modèles visent alors à retranscrire la dynamique des systèmes de villes (leur plus ou moins forte hiérarchisation), mais ils ne disent pas comment la hiérarchisation initiale s'est produite. Par ailleurs, les simulations se font en général avec des systèmes à taille fixe, c'est-à-dire que le nombre de villes n'évolue pas. Or, des villes émergent et d'autres disparaissent (plus rarement).

Comme le notait déjà Jacques Ledent, « l'évolution des systèmes de villes se caractérise par deux éléments principaux : (1) l'accroissement de la dimension du système (nombre et taille des villes) et (2) la rétraction de l'espace entre les villes du système. Mais la plupart des études réalisées à ce jour ignorent ces deux éléments et ne traitent pour ainsi dire que de la régularité qui, dans l'espace comme dans le temps, semble caractériser la disposition des tailles des villes » (Ledent, 1993). Ce constat apparaît toujours d'actualité.

Or, une fois posé que les causes premières de la nature (Krugman, 1996) peuvent expliquer la localisation des villes, il paraît aussi intéressant de savoir comment et où émergent les villes, ces émergences conditionnant partiellement l'évolution des autres.

## **1.6 Positionnement de notre recherche**

Fondamentalement, la ville peut être vue comme un fort potentiel d'interactions, c'est-à-dire comme un moyen de permettre des interactions nombreuses et variées qui autorisent le développement des économies d'agglomération et plus particulièrement de l'innovation :

- À l'échelle de la ville, du quotidien, ce potentiel dépend de la densité et de la vitesse des déplacements,
- À l'échelle du système de villes (déplacement d'une journée), ce potentiel dépend de la localisation de la ville par rapport aux autres et de la qualité des réseaux de transport qui permettent d'interagir plus ou moins aisément avec des villes lointaines.

C'est ce potentiel d'interaction, qui se matérialise par des échanges plus ou moins intenses notamment d'individus, qui fait la richesse de la vie sociale et économique de villes et conditionne leur développement (Glaeser *et al.* 1992). Gibrat, puis Gabaix, ont montré que si l'on considère que les interactions (échanges) entre villes dépendent d'une logique aléatoire, alors il est relativement aisé de produire des réseaux de villes hiérarchisés qui correspondent à ceux observés empiriquement. La hiérarchie dans le système de villes serait donc un fait trivial. Malheureusement, l'observation s'inscrit en faux par rapport à cette logique aléatoire des interactions. Dans la réalité, les villes échangent davantage avec leurs voisines qu'avec les villes plus lointaines, « la Géographie compte », et leurs taux de croissance à chaque époque ne sont pas indépendants. Toutefois, ce modèle très simple reste extrêmement intéressant eu égard à sa fonction de « filtre » ou « d'étalon ».

### 1.6.1 Logiques des interactions et hiérarchie des systèmes de villes

Notre travail se situe dans la même logique que Gibrat et Gabaix. L'objectif est d'élaborer un modèle de simulation, le plus dépouillé possible (approche KISS), permettant de tester différentes logiques d'interaction spatiale entre les villes et d'en voir les effets sur la croissance allométrique des systèmes de villes. À l'image du travail de Gibrat, on souhaite cerner ce qui est « géographique » dans les processus conduisant à l'émergence et la hiérarchisation des systèmes de villes, et ce qui ne l'est pas (l'aléatoire n'est pas géographique alors que l'intensité de l'interaction qui varie avec la distance l'est). Très concrètement, on veut partir d'un ensemble de villes de même taille, définir différentes logiques d'interactions, en faisant notamment jouer un rôle de friction aux interactions à la distance (mesurée avec des unités différentes) et en voir l'effet sur la croissance allométrique des systèmes de villes. Ces interactions vont se matérialiser par des échanges d'individus entre les villes qui vont choisir de déménager au temps  $t$  d'une ville  $i$  à une ville  $j$ , et on veut voir l'effet de différentes logiques d'interaction sur la croissance du système de villes. On souhaite donc mesurer l'effet sur les réseaux de villes de principes fondamentaux concernant l'interaction, identifier de possibles processus universels liés aux interactions, plutôt que d'entrer dans de la complexité thématique. On ne travaille donc pas sur la motivation des déplacements (une attractivité des villes qui serait liée à leurs caractéristiques propres : différences de salaires, d'équipements, etc.), mais sur les logiques de l'interaction, leur effet sur l'intensité des échanges, leur asymétrie, le rôle des facteurs d'éloignement considérés (type de distance) et la différenciation spatiale de la friction liée à la distance. Dit autrement, il s'agit de tester différentes logiques d'interaction et voir leurs effets sur la différenciation des villes par leur taille (pas leur fonction), en prenant le modèle de la loi rang-taille comme référence. L'objectif est de contribuer autant que faire se peut à la « science des villes ».

Plus précisément, on veut voir, à l'aide d'une démarche « pas à pas », l'effet sur l'évolution d'un ensemble de villes de même taille, et dont le nombre ne variera pas dans un premier temps, de différentes logiques d'interactions définies à l'échelle des individus. Les logiques d'interaction qui vont définir combien d'individus vont migrer d'une ville à une autre relèveront de différents registres :

- interactions aléatoires : le choix des villes de destination est aléatoire. Cette simulation doit servir de modèle de référence,
- interactions fonction de l'intensité de la participation aux échanges dans les périodes précédentes : au temps  $t$  une « prime d'attractivité » est donnée aux villes qui ont beaucoup échangé préalablement. Plus une ville contribue aux interactions, plus son attractivité et son prestige vont croître,
- interactions fonction de la contribution aux échanges et de la distance séparant les villes.

Plus une ville est proche et plus elle a préalablement contribué aux échanges, plus elle sera attractive. La distance entre villes pourra être euclidienne, ou mesurée sur le réseau de transport (en kilomètres, en temps ou topologiquement). Pour cette logique d'interaction, les réseaux de transport vont donc jouer un rôle déterminant dans l'évolution du système de villes. Rôle qui a déjà été mis en avant par le modèle SimpopNet exploré notamment par Raimbault (Raimbault, 2018). En testant différents idéaux types de réseau (très connectif, réseau Invariant d'échelle (Barabási, Albert, 1999), Small world (Milgram, 1967)), on souhaite voir comment le type de réseau, dont la métrique générale est connue, influence la hiérarchisation du système de villes à logique d'interaction donnée. On veut aussi aborder la question de réversibilité de la trajectoire du système de villes (notion de *path dependency*) : avec un réseau donné, une hiérarchisation du système de villes se met en place, mais une fois « lancée », cette hiérarchie est-elle modifiable si on change la nature du réseau ou si on change ses fonctionnalités (par exemple avec des vitesses de déplacement plus rapides) ? On veut ici toucher du doigt le degré de liberté dont disposent les aménageurs quant à l'évolution des systèmes de villes. Les réseaux ne sont donc pas abordés comme de simples supports des interactions, mais aussi comme des vecteurs déterminants dans la trajectoire des systèmes de villes.

Dans cette première partie de notre travail, il s'agit donc d'analyser comment différentes logiques d'interaction qui déterminent les échanges d'individus entre villes, et à l'exclusion de tout autre paramètre, produisent ou pas de la hiérarchie dans les systèmes de villes et dans quelle mesure cette hiérarchie correspond au modèle de la loi rang-taille. Il s'agira plus particulièrement de cerner le rôle de la structure morphofonctionnelle des réseaux de transport et de voir leur possible contribution comme levier d'aménagement pour infléchir des trajectoires de systèmes de villes.

Techniquement ces simulations seront effectuées à l'aide de simulations SMA. Une part des agents, les habitants des villes, va à chaque pas de simulation déménager vers une destination qui sera choisie en fonction de la logique des interactions modélisée. La modélisation SMA à l'échelle désagrégée des individus permet que, à chaque pas de temps, le choix de chaque agent soit conditionné par celui des autres.

### 1.6.2 Émergence des villes

Comme la première phase de notre travail considère un système de ville de taille fixe, elle ne traite donc pas de la question de l'émergence. Or, on l'a vu dans l'état de l'art, cette question reste peu abordée bien que déterminante pour une compréhension globale des systèmes de villes.

Aussi, une deuxième phase de notre travail se propose d'aborder la question de l'émergence des villes : où apparaissent-elles ? Là encore, il s'agit de traiter cette question sous le seul angle de l'interaction à l'échelle individuelle, dans la continuité des travaux précédents. Des individus vont se déplacer depuis chez eux pour échanger avec ceux d'autres villes. En se déplaçant le long de réseau de transport, ils vont se rencontrer « en chemin », échanger et en tirer un profit. Au fil des simulations, les agents vont mémoriser les lieux où les transactions ont été pour eux les plus profitables. L'échange se fait donc ici en des lieux précis, pas sur des marchés dématérialisés. Ces lieux profitables vont être ceux pour lesquels les agents sont entrés en contact avec de nombreux autres agents sans qu'ils aient eu à supporter des coûts importants pour les atteindre.

Quand suffisamment d'agents se rencontrent de façon bénéfique en un lieu, ils vont considérer qu'il va être plus profitable de s'y installer, et une ville va alors émerger. On retrouve ici une logique assez proche des travaux de Michael Batty (Batty, 2001). Il s'agira donc d'analyser où

ces concentrations d'interactions profitables, donnant *in fine* naissance à des villes, apparaissent ; comment la structure du réseau de transport initial influence ces localisations et leur nombre ? L'idée est une nouvelle fois de voir dans quelle mesure des règles très simples de simulation des interactions parviennent à capter quelque chose de l'émergence des villes et *in fine* de l'évolution des systèmes de villes.

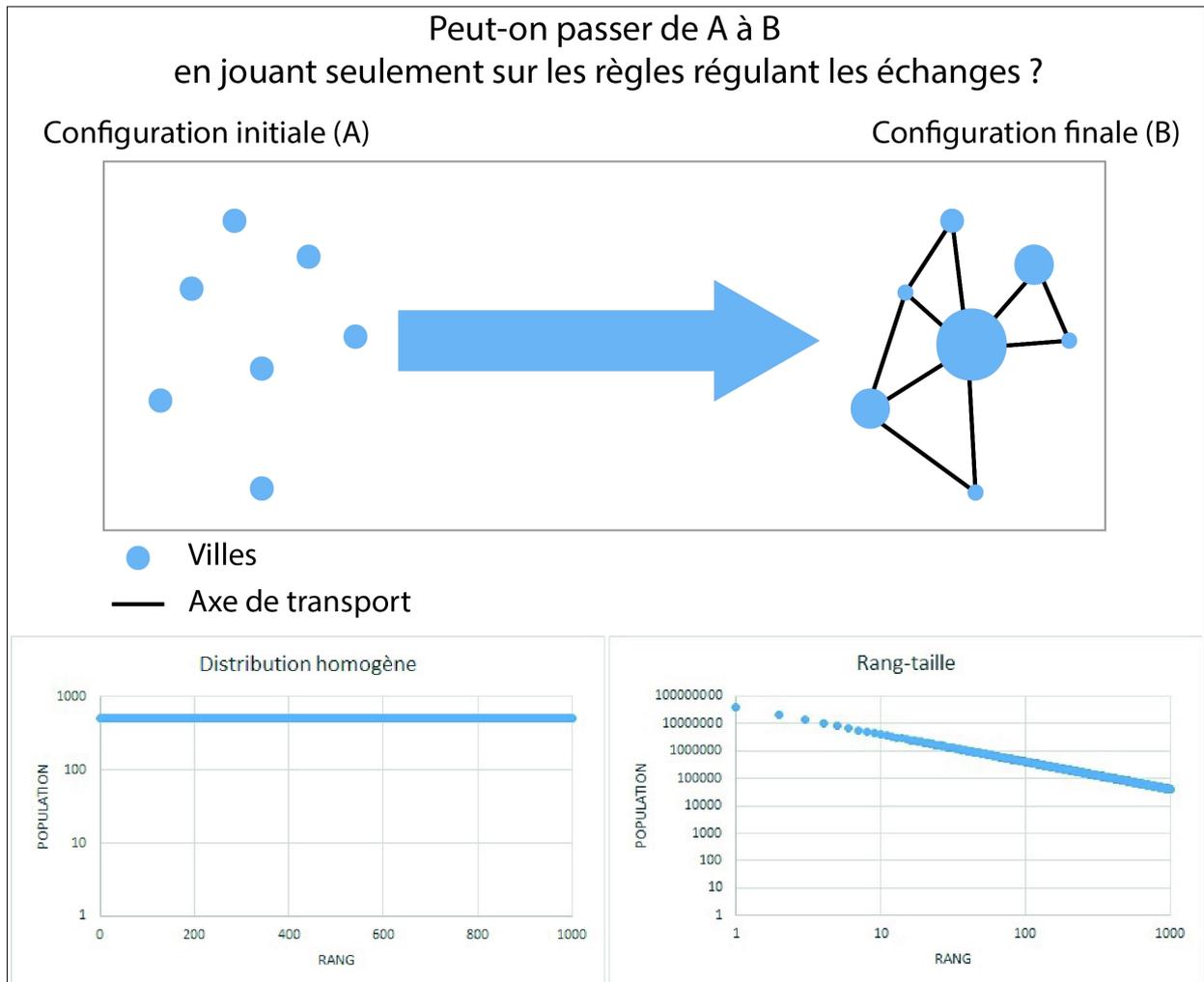


Figure 5: Quelles sont les règles transitoires pour passer de A à B ?

Dans ce premier temps du travail sur l'émergence des villes, le nombre de villes évolue, mais pas le réseau de transport qui les relie. Or, il a été montré que systèmes de villes et réseaux de transport coévoluent (Baptiste, 1999 ; Raimbault, 2018) et que, dans une logique d'investissement où l'efficacité prime sur l'équité (Boiteux, 2001), le réseau de transport tend à renforcer les hiérarchies en place. Aussi, dans une dernière phase de notre travail, nous avons cherché à traiter de l'émergence des villes et de la coévolution avec le réseau de transport. Chaque nouvelle ville émergente va être l'occasion d'une possible modification du réseau de transport.

Toujours dans la même perspective, ce travail sur l'émergence des villes et leur coévolution avec le réseau de transport vise à mieux comprendre comment s'effectue le passage d'un peuplement homogène, disparate, à un peuplement avec une structure hiérarchique plus ou moins prononcée, et qui tend à se densifier. Il s'agira, comme précédemment, de mieux comprendre d'éventuels

processus de *path dependency* : est-ce la structure de base du semis de villes qui va dicter la forme finale, ou des villes émergentes vont-elles pouvoir s'imposer ? On s'intéressera donc ici à la structure globale du système de villes (plus ou moins hiérarchisé), mais aussi aux trajectoires individuelles des villes et à leurs déterminants.

Notre travail s'inscrit donc bien dans la ligne tracée par Pumain pour qui « la question n'est pas tant d'imaginer une explication unique, de ou par la loi rang-taille, qui rendrait compte de tous ces exemples, mais de comprendre quels types de processus contribuent à engendrer cette forme de distribution, à partir de dynamiques similaires, mais qui mettent en jeu des rapports entre des forces et des formes d'évolution de nature très différente » (Pumain, 2012b).

Comme le résume la figure ci-dessous, chaque simulation répond à un questionnement afin de comprendre le passage d'un système de peuplement à un autre.

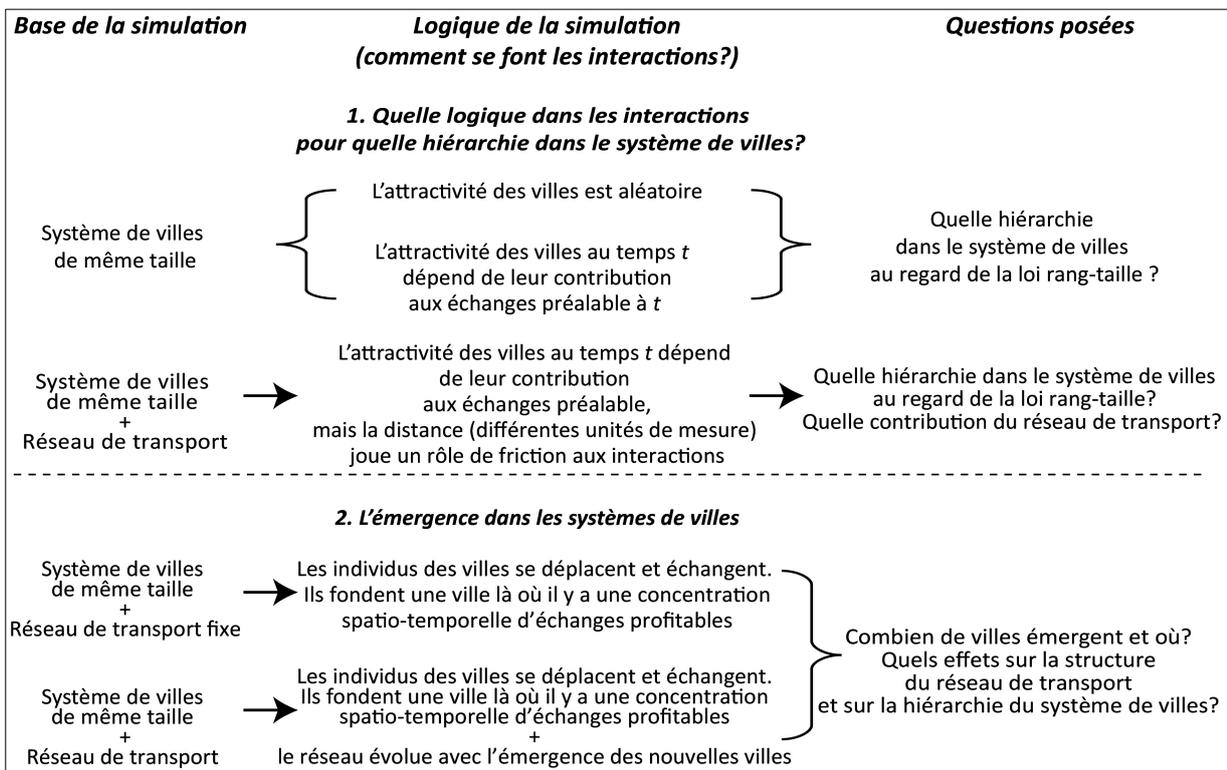


Figure 6: Questionnements

Pour traiter des effets sur l'émergence et la croissance des systèmes de villes de différentes logiques d'interactions, nous développerons des modèles simples à visée « d'intelligibilité ». Il ne s'agit pas d'être prédictif, d'être capable de reconstituer la trajectoire de systèmes de villes et de l'extrapoler pour le futur, mais bien de cerner le poids de la seule logique des interactions dans l'évolution des systèmes de villes. Indirectement, si nos modèles parviennent à produire des systèmes de villes « crédibles » par rapport aux réseaux empiriques, cela revient à discuter de la théorie de l'innovation. Dit autrement, a-t-on vraiment besoin de cette théorie pour comprendre l'émergence et la hiérarchisation des systèmes de villes ?

Par ailleurs, si notre objectif n'est pas la prédiction, il n'en reste pas moins que mieux maîtriser les processus d'évolution des systèmes de villes aide à générer des scénarios possibles pour le futur, ce qui est un des buts de la modélisation (Perez, Banos, Pettit, 2016).

Dans notre travail, la modélisation est vue comme un instrument de connaissance qui s'appuie sur la simulation informatique pour tester des hypothèses, des jeux de paramètres permettant de cerner le rôle de la logique des interactions dans l'évolution des systèmes de villes. Indirectement, ces simulations montrent que l'existant n'est qu'une des possibilités dans un univers de possible.

La modélisation des interactions entre les villes se fera à l'aide de SMA dont on a vu la pertinence (cf. 1.5.3) pour appréhender les systèmes complexes adaptatifs que sont les systèmes de villes. L'individu sera au centre de la modélisation, ce qui est aujourd'hui rendu possible grâce à la puissance de calcul des ordinateurs qui permettent cette vision désagrégée. L'utilisation de SMA permettra de simuler comment une structure émerge à un niveau macroscopique en conséquence d'interactions entre des agents nombreux à l'échelle microscopique (Ferber, 1995). Un autre intérêt des SMA est qu'ils permettent une approche géographique puisque l'espace a une métrique alors que, comme le note Pumain et Sanders, « *spatial networks dynamics are still difficult to represent in mathematical models by differential equation* » (Pumain, Sanders, 2013). Ce travail se place donc dans la catégorie de la modélisation générative définie par Epstein (Epstein, 2006) dans son manifeste pour des sciences sociales génératives, avec comme principe fondamental de chercher à expliquer des régularités macroscopiques comme émergentes des interactions entre entités microscopiques, en simulant l'évolution du système de manière générative.



## 2 Quelles logiques pour les interactions dans les systèmes de villes pour quelle croissance allométrique ?

Nous posons l'hypothèse selon laquelle l'explication des croissances différentielles est le fruit de potentiel d'interaction inégal. Les villes qui échangent et interagissent le plus sont celles qui vont figurer au sommet de la hiérarchie urbaine des régions ou pays étudiés.

Afin d'étudier cette hypothèse, nous allons simuler la croissance urbaine pour établir l'influence de chaque paramètre dans notre modèle. L'objectif est d'étudier comment différentes logiques d'interactions vont conditionner les flux migratoires et la structure hiérarchique finale du système de villes. Pour cela il est nécessaire de procéder par étapes en validant « pas à pas » nos hypothèses.

À partir de systèmes de villes théoriques, au nombre de villes fixé à l'avance, l'interaction et les flux migratoires seront simulés selon quelques grandes logiques types. Tout d'abord, sans coût pour l'interaction en fonction de logiques aléatoires, l'espace ne rentre donc pas en compte, puis avec des logiques d'attractivité, selon la contribution de chaque ville aux interactions globales. Ainsi, nous étudierons les conséquences sur la hiérarchie urbaine des deux logiques d'interaction utilisées.

Nous allons ensuite étudier le même système, mais en ajoutant une dimension spatiale à l'interaction. L'historique des interactions de chaque ville et le réseau de transport vont déterminer les nouveaux flux. Chaque ville sera plus ou moins attractive en fonction de sa position au sein de réseaux de transport type et théorique. Cela dans le but de comprendre comment l'espace et les réseaux de transport influencent la hiérarchisation des systèmes de villes. Enfin, comme la croissance d'une ville est fonction de sa position au sein du réseau de transport, il s'agira d'étudier les conséquences d'une modification des caractéristiques morphofonctionnelles du réseau de transport sur la structure hiérarchique des systèmes de villes. En matière d'aménagement du territoire, il est en effet important de connaître l'impact potentiel de modifications du réseau de transport sur la hiérarchie urbaine afin d'en connaître l'inertie, ce qui revient à étudier indirectement la *path dependency* du système de villes (Sanders, 2014).

### 2.1 Des logiques « a-spatiales » d'interaction permettent-elles de produire des systèmes de villes hiérarchisés ?

Nous allons dans un premier temps, construire un modèle a-spatial des interactions pour étudier sa capacité à générer des structures hiérarchiques de systèmes de villes. L'objectif est de montrer l'influence de l'interaction dans le passage d'un système de peuplement composé de villes de taille identique à une répartition inégale de la population dans ces villes.

Le modèle présenté dans cette partie a été conçu pour simuler la croissance urbaine sans intégrer l'espace. Le coût de l'échange, représentant ici la migration résidentielle, est nul. La friction de l'espace n'est pas modélisée ce qui offre les mêmes probabilités pour des villes  $j$  d'être destination du flux d'individus de  $i$  que  $j$  soit lointaine ou pas.

L'objectif est double : étudier les effets de différents paramètres de la croissance urbaine sur l'émergence de la distribution hiérarchique des villes d'un système en interaction, et comparer la structure hiérarchique obtenue avec la loi rang-taille.

Deux sous-modèles ont été créés : le modèle aléatoire (flux migratoire aléatoire) et le modèle contribution (flux migratoire conditionné par la contribution des villes aux interactions).

### 2.1.1 Choix aléatoire des destinations : le modèle aléatoire

On considère un système fictif de 1000 villes en faisant l'hypothèse que la croissance inégale des villes va être le résultat sur le long terme de leurs interactions asymétriques. Les interactions (ou échanges) sont assimilées aux migrations résidentielles, c'est-à-dire que les individus migrent définitivement d'une ville à l'autre. Quand nous parlons d'échange, nous considérons aussi bien le fait d'envoyer que de recevoir de la population.

Les simulations consistent alors à définir des règles régulant les échanges : quel pourcentage de population de quelles villes migre, pour aller où ? À répéter dans une logique itérative cette opération, pour enfin analyser après  $n$  itérations les effets des paramètres de la simulation sur la croissance allométrique des villes. Les simulations sont effectuées pour 1000 villes fictives sur une période longue assimilable à 600 ans (un an correspondant à une itération ou *ticks*).

Chaque ville a une croissance qui dépend de deux paramètres :

1. Une croissance interne, qui correspond à la croissance naturelle et qui est la même pour toutes les villes, car l'objectif du modèle est de se focaliser sur la seule contribution des échanges à la croissance différenciée des villes. Dans ce modèle, la croissance naturelle a plusieurs fonctions : elle permet d'éviter que des villes décroissent jusqu'à éventuellement disparaître, et elle permet surtout de faire croître la population totale du système afin d'étudier l'évolution potentielle de la concentration de la population dans quelques villes.
2. Une croissance liée aux migrations qui est le solde des arrivées moins les départs. Chaque ville est composée de  $x$  individus fictifs. Ils ne représentent que des chiffres et ne seront pas modélisés par des agents « mouvants » qui se déplaceront d'une ville à l'autre.

On étudiera deux cas de configuration initiale : (i) les villes ont la même population (fixée arbitrairement à 250 ou 500) ; (ii) les villes ont des populations inégales, mais proches (avec une amplitude de plus ou moins 50 habitants). Ce choix de scénarii où on fait varier les populations initiales vise à analyser les conséquences de la situation initiale, notamment l'homogénéité des populations, sur la distribution hiérarchique finale.

Les échanges entre les villes sont régulés par les règles suivantes :

- On sélectionne à chaque itération un pourcentage d'individu dans chaque ville qui vont migrer (1 ou 2%) : les « migrants ». Puis ces individus vont être affectés à des destinations choisies de façon totalement aléatoire. Précisons que tous les individus d'une ville de départ n'ont pas forcément la même ville de destination. Concrètement on sélectionne dans ce groupe de « migrants » un nombre aléatoire d'individus à qui on affecte aléatoirement une destination. On renouvelle l'opération jusqu'à ce que tous les migrants aient migré.
- Cette opération est effectuée successivement pour chaque ville. Une fois que tous les flux migratoires ont été simulés, toutes les villes vont calculer leur croissance naturelle. Le solde migratoire peut être négatif si la ville voit partir plus de migrants qu'elle en accueille.
- Puis les villes vont calculer leur nouvelle population qui va correspondre à :

$$\text{nouvelle population} = \text{population initiale} + \text{solde migratoire} + \text{croissance naturelle}$$

La même opération est ensuite répétée à chaque nouveau pas de simulation supposé correspondre à une nouvelle année. La simulation s'arrête après 600 pas de simulation (*ticks*), car au-delà les structures hiérarchiques ne changent plus.

### 2.1.2 Diagramme UML du modèle aléatoire

Nous avons recours à la formalisation UML (*Unified Modeling Language*) afin de formaliser et communiquer sur le fonctionnement des modèles utilisés.

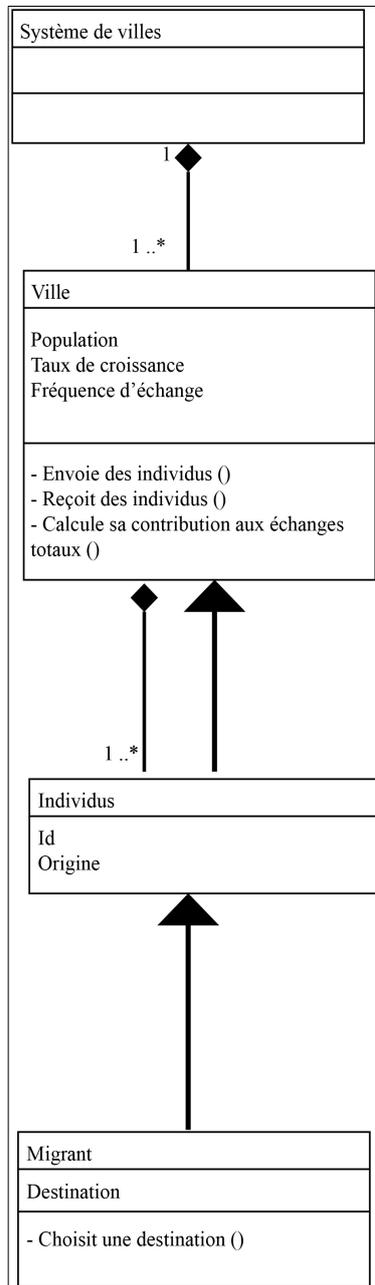


Figure 7: Diagramme de classe (modèle aléatoire)

La migration résidentielle est effectuée par un pourcentage des individus qui composent les villes. Chaque ville effectue l'une après l'autre cette migration.

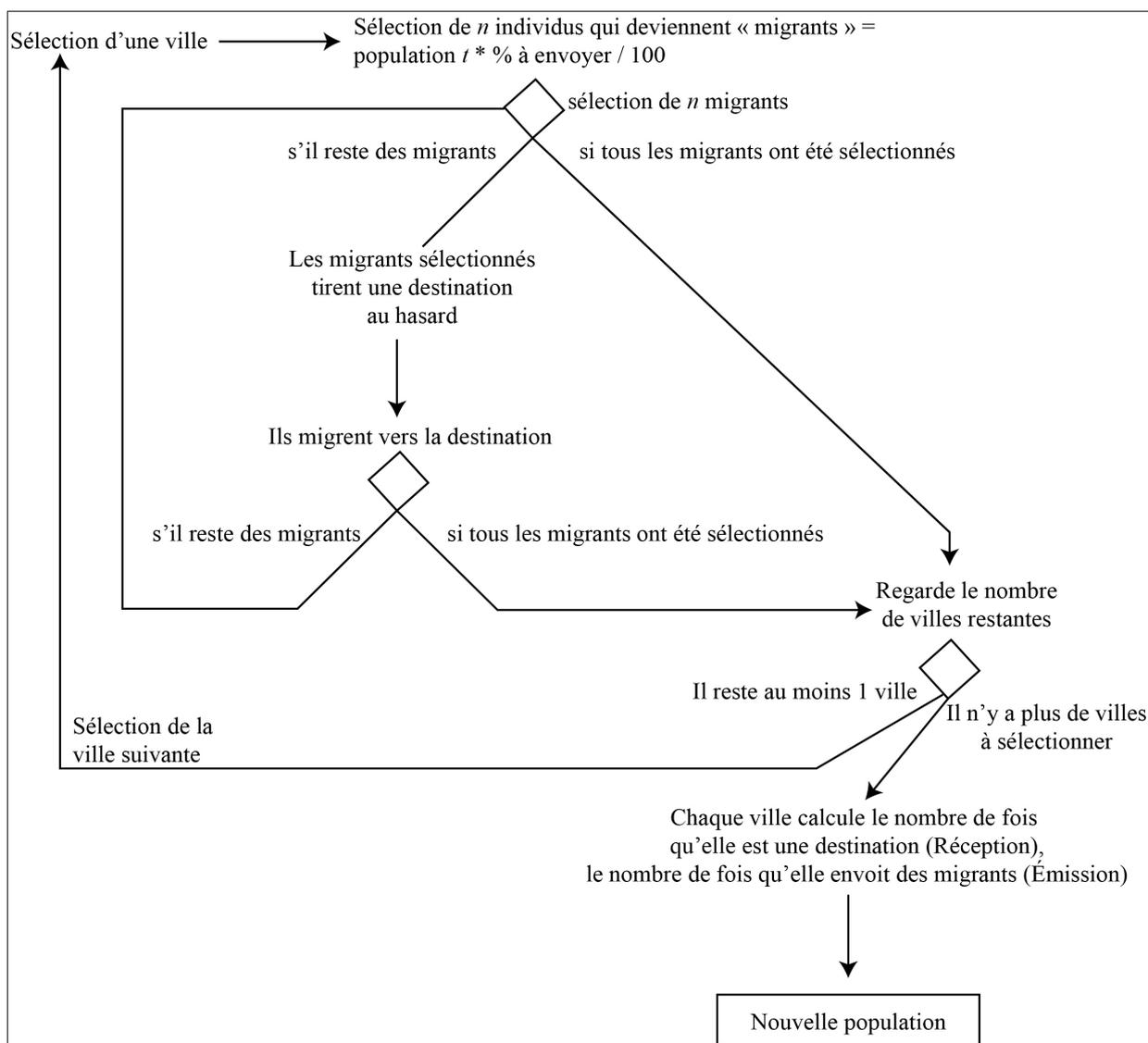


Figure 8: Diagramme d'activité (modèle aléatoire)

Cette première logique d'interaction qui n'intègre pas la Géographie est la plus simple : les individus migrent aléatoirement. Une deuxième logique toujours non spatiale a été implémentée. Les villes vont être d'autant plus attractives qu'elles contribuent fortement aux échanges.

### 2.1.3 La destination des flux est choisie en fonction de la contribution des villes aux échanges : modèle contribution

Nous posons l'hypothèse que la croissance différenciée des villes s'explique par une inégale contribution aux interactions. Nous nous inspirons des travaux de Gabaix (Gabaix, Ionides, 2003 ; Gabaix *et al*, 2003 ; 2011) et de Clare (Clare, Motson, Thomas, 2013) qui stipulent que les performances sur le marché financier sont fonction du nombre d'échanges effectués, peu importe la valeur. Une ville interagit du moment qu'elle est réceptrice ou émettrice de flux migratoires. Plus un individu échange plus il peut faire de « profit ». Il peut en être de même avec une ville qui échange. On est alors dans une logique de « prime à l'activité » où la ville qui a beaucoup échangé (en négatif ou positif) en tire bénéfice en termes d'attractivité. Ce qui revient à dire que : la ville a beaucoup échangé, donc elle s'est fait connaître, ce qui contribue à son

attractivité. C'est le principe de variation-stabilisation dans lequel on récompense les éléments qui contribuent à l'interaction (Heudin, 1998).

Nous pouvons aussi faire un parallèle avec les neurones dans le système neuronal. En effet, un neurone qui ne contribue peu ou pas aux échanges synaptiques va se voir de plus en plus déconnecté de l'ensemble des neurones. À contrario un neurone qui participe beaucoup aux interactions et donc au fonctionnement du système neuronal, va voir son nombre de connexions augmenter tout comme sa sollicitation (Hebb, 1949).

Pour les villes, pourrait-il en être de même ? Une ville qui contribue fortement aura son attractivité renforcée sur le moyen long terme, car on voudra renforcer son interaction avec elle. Cette attractivité va avoir pour conséquence de lui conférer un solde migratoire fortement positif.

C'est pour cette raison que la même base que pour le modèle aléatoire a été gardée, à la différence que le choix des destinations à chaque itération n'est plus fait de façon aléatoire. En effet, on calcule après chaque année simulée la contribution des villes aux échanges depuis le début de la simulation et c'est cette contribution qui va définir l'attractivité des villes.

Cette contribution correspond à la fréquence avec laquelle la ville a échangé par rapport au total des échanges depuis le début de la simulation. Pour une ville  $i$  la contribution aux échanges  $F_i$  est égale à  $F_i = n_i / N$ , avec  $N$  le nombre d'échanges ayant eu lieu entre toutes les villes du système depuis le début de la simulation et  $n_i$  le nombre d'échanges (émis et reçus) concernant la ville  $i$ . Précisons que pour une ville  $i$  une interaction de  $i$  à  $j$  (flux sortant) et de  $j$  à  $i$  (flux entrant) compte pour deux échanges. Les quantités d'individus échangés ne sont donc pas considérées afin de ne traiter que l'impact de l'interaction, du déplacement d'un lieu vers un autre. Précisons encore que les échanges à la première étape de simulation sont aléatoires afin d'initialiser le système, puisqu'au départ toutes les villes ont la même taille et la même attractivité. Ce n'est qu'à partir de la 2e étape que le calcul de l'attractivité se met en place en fonction de la contribution aux échanges préalables. Concrètement :

- On crée deux variables :

- Le minimum des fréquences  $F_i$  :  $\min f_i$
- Le maximum des fréquences  $F_i$  :  $\max f_i$

- On tire un nombre aléatoirement compris entre  $\min f_i$  et  $\max f_i$ . On crée une liste de villes dont  $f_i$  est supérieure ou égale à ce nombre tiré aléatoirement. Cette liste se nomme « *liste\_proba* ». Elle contient toutes les villes qui ont le plus contribué aux interactions totales depuis le début de la simulation,

- On crée deux nouvelles variables :

- Minimum de la *liste\_proba*.
- Maximum de la *liste\_proba*.

- Chaque individu qui doit migrer choisit la destination en tirant au hasard une ville de *liste\_proba*.

Ce modèle augmente la probabilité des villes qui contribuent le plus aux échanges de devenir une destination étant donné qu'il est peu probable que les villes ayant un  $f_i$  important se retrouvent en dehors de la *liste\_proba*. Cette dernière représente la liste des choix de destinations pour les individus pour chaque année simulée.

Cet algorithme permet d'observer les conséquences de l'attractivité sur la forme de la distribution hiérarchique finale. En augmentant la probabilité d'une ville d'être sélectionnée

comme destination, on favorise sa croissance exogène. Puisque la croissance exogène d'une ville se fait au détriment des autres, alors on s'attend à observer des écarts nets de croissance et de taille de villes. Les villes qui contribuent peu aux interactions vont alors voir leur population évoluer moins rapidement ou décliner au profit des villes les plus « attractives » qui contribuent le plus aux interactions. L'idée est ici de voir si cette modélisation « simple de l'attractivité » des villes pourrait expliquer la distribution hiérarchique des villes et plus spécifiquement selon des distributions puissances.

### 2.1.4 Diagramme UML du modèle contribution

Le fonctionnement du modèle contribution bien que relativement identique au modèle aléatoire, demande à chaque ville de garder en mémoire sa contribution aux interactions totales depuis le début de la simulation.

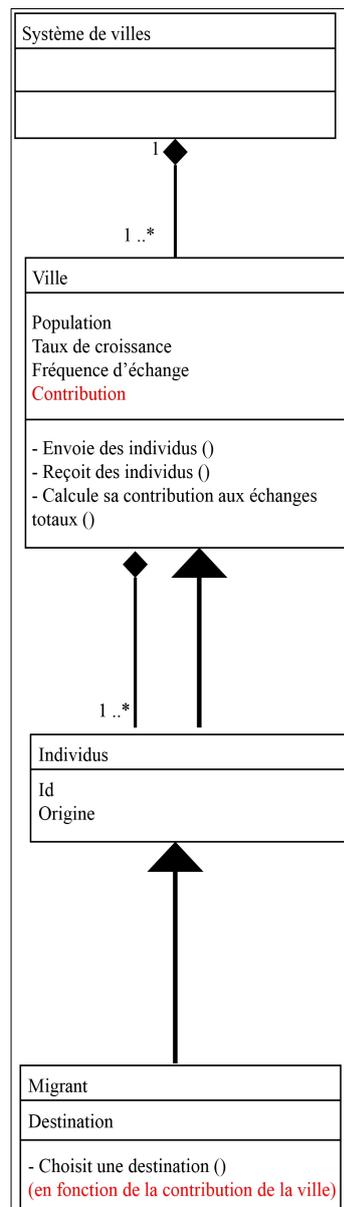


Figure 9: Diagramme de classe (modèle contribution)

Les villes calculent le nombre de fois qu'elles émettent ou reçoivent un flux migratoire et non pas le nombre de « migrants ». On considère que chaque flux migratoire a le même poids ce qui permet de considérer que l'attraction d'une ville est fonction de sa contribution aux interactions en ne considérant alors que le nombre de flux.

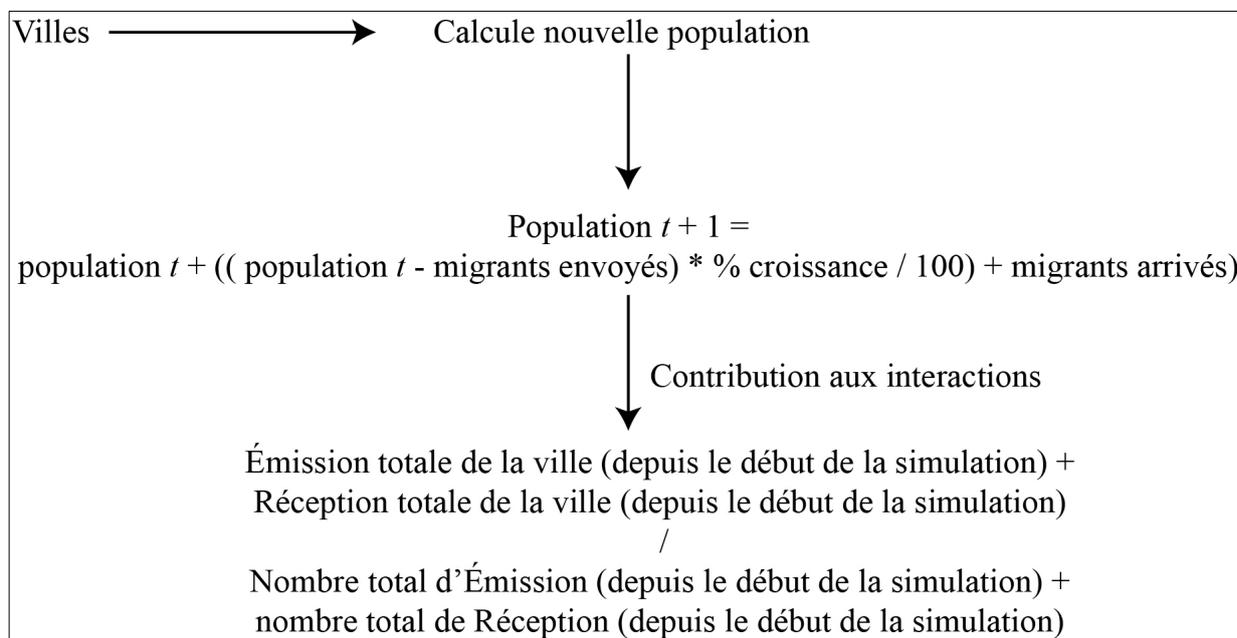


Figure 10: Diagramme de séquence (calcul de la contribution aux interactions)

### 2.1.5 Plan d'expérience

Afin de tester ces deux modèles a-spatiaux, nous avons construit un plan d'expérience qui fait varier les différents paramètres des modèles afin d'en tester les effets sur les résultats en termes de hiérarchie du système de villes obtenues. Dans ce plan d'expérience nous faisons varier : la population initiale des villes, la croissance naturelle, le taux de migration. Le nombre de villes est fixé à 1000 pour toutes les simulations.

- La population initiale peut soit être la même pour toutes les villes [250 ou 500], soit varier légèrement de plus ou moins 50. Dans le premier cas, on cherche à voir comment se déroule la hiérarchisation des villes, dans le second on veut en plus étudier si et comment un léger avantage initial (une taille un peu plus importante) conditionne ou pas les résultats globaux et les résultats pour ces villes ayant un avantage initial. Ces populations initiales sont volontairement basses afin de comprendre comment la simple interaction, à partir de petits foyers de peuplement naissant de taille relativement identique, peut influencer l'émergence des systèmes de villes hiérarchisés.
- La croissance naturelle est la même pour toutes les villes au cours de la simulation. Elle prend les valeurs [0.5% ; 1% ; 1.5%]. Nous gardons des valeurs relativement faibles afin de rester dans des ordres de grandeur observables et éviter d'atteindre des tailles de villes trop grandes. Par exemple, une ville de 250 habitants qui connaît un taux de croissance naturelle tous les ans de 1% aura une population finale de 96 926 au bout de 600 ans, et ce sans simuler l'apport possible de flux migratoires supplémentaires. Si on regarde la

moyenne des taux d'accroissement naturel entre 2009 et 2019 pour plusieurs pays (Argentine 1.02 ; Australie 0.69 ; Bénin 2.87 ; Égypte 2.13 ; France 0.38 ; Ouzbékistan 1.77) d'après les données de la Banque Mondiale<sup>3</sup>, on constate que les valeurs retenues sont dans un ordre de grandeur correspondant aux valeurs empiriques.

- Le pourcentage d'individus qui vont migrer par rapport à la population totale de la ville va varier avec pour valeur [1% ; 1.5% ; 2%]. Le choix des valeurs est arbitraire et ne correspond pas à une réalité observable. Ces valeurs ont pour unique objectif de garantir les flux migratoires sans simuler des déplacements massifs d'individus d'une ville vers une autre reproduisant des configurations d'exode rural, d'épidémie, ou de guerre. La variation des valeurs nous intéresse cependant afin d'étudier leur répercussion sur la hiérarchisation finale.

Pour chaque variation dans les valeurs des paramètres, il est essentiel de réitérer plusieurs simulations pour obtenir des résultats fiables et robustes. En effet, le résultat d'une seule simulation peut être totalement singulier du fait que le modèle est non-déterministe et à horizon fini, c'est pourquoi seule la répétition permet de voir si des tendances générales émergent. De par la nature stochastique de la simulation, nous ne pouvons pas toujours obtenir les mêmes résultats, les rangs hiérarchiques ne vont pas être distribués aux mêmes villes, en laissant tous les paramètres fixes, à moins d'utiliser la même suite des nombres aléatoires. C'est aussi cet aspect stochastique qui rend nécessaire la multiplication des simulations. Chaque configuration est alors simulée 5 fois.

Population initiale de chaque ville	Croissance naturelle des villes	% d'individu de chaque ville migrant à chaque « pas de temps »
250	0.5	1
		2
	1	1
		2
	1.5	1
	500	0.5
2		
1		1
		2
1.5		1
[200 ; 300]		0.5
	2	
	1	1
		2
	1.5	1
	[450 ; 550]	0.5
2		
1.5		1

Tableau 2: Plan d'expérience pour chacun des deux sous-modèles

<sup>3</sup> <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Nous allons à présent présenter les résultats des simulations réalisées qui visent à savoir si, eu égard aux logiques d'interaction simulées, on obtient ou pas des systèmes de villes hiérarchisés et si cette hiérarchie correspond à une loi rang-taille choisie comme repère. Nous tacherons ensuite d'étudier les logiques de hiérarchisation afin de savoir s'il est possible d'expliquer la place des villes dans la hiérarchie urbaine.

Les résultats qui vont être présentés s'appuient sur les simulations avec une population initiale égale pour chaque ville, car les simulations avec des populations initiales inégales n'ont pas permis de mettre en évidence des différences notables.

Le plan d'expérience utilisé ne faisant pas appel à des paramètres spatiaux, nous avons utilisé le logiciel *R*.

### 2.1.6 Le choix de « *R* » comme plateforme de modélisation

Le modèle étant a-spatial, pratiquement nous avons mobilisé la solution *R*<sup>4</sup>. Le langage *R* et le GNU *R*, logiciel libre, sont idéaux pour faire du traitement statistique ou de la modélisation a-spatiale. *R* nous permet de créer virtuellement des villes en interaction selon les paramètres que nous souhaitons. Il permet aussi d'en étudier les résultats très rapidement. Nous avons opté pour l'environnement de développement libre *RStudio*<sup>5</sup> comme interface de travail. La durée de certaines simulations pouvant durer 24h ou plus sur certains ordinateurs, tous les calculs ont été exécutés sur les serveurs du LIA (Laboratoire d'Informatique d'Avignon)<sup>6</sup> que nous remercions grandement.

Précisions, que par rapport au plan initial de simulation, nous n'avons pas pu simuler la configuration de simulation avec une croissance naturelle des villes à 1.5% et un taux de migration de 2%, car elle demandait une capacité de calcul supérieure à celles des serveurs de calcul et du logiciel utilisé causant alors des erreurs.

### 2.1.7 Comparaison des hiérarchies simulées avec les hiérarchies théoriques

Les hiérarchies obtenues par simulation de différentes logiques d'interaction sont systématiquement comparées à des distributions hiérarchisées rang-taille.

---

*Rappelons que la loi rang-taille met en avant la relation statistique entre la taille ( $P$ ) et le rang ( $r$ ) des villes selon la relation harmonique où  $P1 = b =$  la population de la plus grande ville, et l'exposant «  $a$  » avoisine 1 ou une valeur s'y rapprochant. La population théorique d'une ville selon son rang est égale à  $P(r)$  où*

$$P(r) = b.r^a$$

*Ce qui donne une version simplifiée de la loi rang-taille :*

$$P(r) = P1/r$$

*Si on utilise  $P(r) = P1/r$  alors la droite a pour origine  $P1$ .*

*Pour cette formule, la seconde ville a pour population la moitié de la première et la troisième ville le tiers de la première et ainsi de suite.*

---

<sup>4</sup> <https://www.r-project.org/>

<sup>5</sup> <https://www.rstudio.com/>

<sup>6</sup> <http://lia.univ-avignon.fr/>

La comparaison des systèmes obtenus avec la forme la plus simple de la loi rang-taille n'est pas sans poser problème. En effet, comme l'explique Belhedi à propos de l'équation de la loi rang-taille, « la recherche de la simplicité à tout prix a conduit à des aberrations, la première consiste à ériger le cas particulier [la loi rang-taille] en une norme tandis que la seconde consiste à prendre la première ville, qui n'est que le produit du système, comme base pour déterminer la taille des autres villes » (Belhedi, 2001). L'auteur nous prévient qu'il s'agit d'une dangereuse simplification, car on n'a jamais démontré que ce cas particulier est une norme, aucun pays ne permet de montrer que (a) est égal à l'unité ou que (b) est équivalent à la population de P1. Les études montrent uniquement qu'on se rapproche de ces valeurs (Belhedi, 2001). Il faut garder la particularité de chaque système de villes et ne pas vouloir appliquer la même formule pour toutes.

En effet, « comment saisir, exprimer et déterminer la sururbanisation et la primatialité si tout le système est calibré sur la première ville qui est considérée comme normale puisqu'elle est prise comme référence ? » (Belhedi, 2001). Comme la loi de Zipf, ou rang-taille, est une loi de répartition et de distribution de la population à l'intérieur d'un système de villes, l'auteur propose alors de prendre comme référence la population totale plutôt que celle de la première ville.

---

«  $P =$  population urbaine totale du système

$P1 =$  population de la 1<sup>re</sup> ville

$P1 = P / \sum (1/r)$ , avec  $r$  le rang de la ville,

car  $P = P1 + P2 + P3 + \dots + Pn$

$P = P1 \frac{1}{2} P1 + \frac{1}{3} P1 + \frac{1}{4} P1 \dots + \frac{1}{n} P1$

$P = P1 (1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{n})$

$P1 = P / \sum (1/r)$  » (Belhedi, 2001)

---

La seule référence à la loi rang-taille dans sa forme la plus simple correspondant à l'équation de Zipf où  $P(r) = P1/r$  où P1 est égal à la population de la ville de Rang1 nous apparaît donc insuffisante. Les résultats de chaque simulation ont donc aussi été comparés à l'équation de Belhedi où P1 est égal à la population théorique de la ville de Rang1 calculée selon  $P1 = P / \sum (1/r)$ .

Pour calculer les distributions théoriques des villes, on sélectionne la ville la plus grosse à la fin de la simulation (P1 simulée) et pour avoir la taille théorique de la deuxième ville on calcule :

- Pour Zipf :  $P(r) = P1 \text{ simulé} / r$
- Pour Belhedi :  $P(r) = P1 \text{ théorique} / r$  où  $P1 = P / \sum (1/r)$

On poursuit ensuite pour les villes de rang 3, 4, ... , n.

Nous nous appuyerons sur des hiérarchies obtenues au cours des simulations et le calcul des deux distributions théoriques (celle donnée par Zipf et celle donnée par Belhedi), pour apprécier leurs écarts, notamment en représentant graphiquement les différentes distributions. Nous avons obtenu 50 graphiques de distributions hiérarchiques pour le modèle aléatoire et 50 pour le modèle contribution, mais ne sont présentés que quelques exemples représentatifs des résultats obtenus.

Au-delà de la visualisation graphique des résultats, nous calculons pour chaque simulation les écarts pour les villes de rang  $n$  entre leur population simulée et la population qu'elles devraient

avoir selon Zipf. Ensuite, la somme de ces écarts est calculée en valeur absolue. La valeur obtenue nous permet d'appréhender l'écart des hiérarchies urbaines simulées avec la loi rang-taille théorique. Une somme des écarts élevée traduit une distribution qui s'écarte de la théorie. Il n'est pas nécessaire d'étudier les écarts entre la distribution simulée et la distribution théorique proposée par Belhedi, car elle garde la même population totale que la distribution simulée rendant la somme des écarts nulle.

Cependant une étude de la forme des deux distributions est pertinente pour voir comment la distribution simulée s'écarte de la forme qu'elle aurait dû prendre en respectant l'équation de la loi rang-taille.

### 1. Modèle aléatoire

Au vu des distributions obtenues, nous pouvons observer quelques points intéressants à souligner. Tout d'abord, il apparaît que la formalisation d'échanges aléatoires entre des villes suffit à créer une hiérarchie. Même si cette hiérarchie est peu marquée, on obtient des tailles de villes inégales pour des mêmes taux de croissance naturelle et des tailles initiales similaires (cf. Figure 11).

La forme de la distribution de la hiérarchie simulée s'écarte des deux distributions théoriques. Ainsi, si l'échange aléatoire crée de la hiérarchie, elle est en revanche loin de la structure théorique décrite par Zipf dans la loi rang-taille.

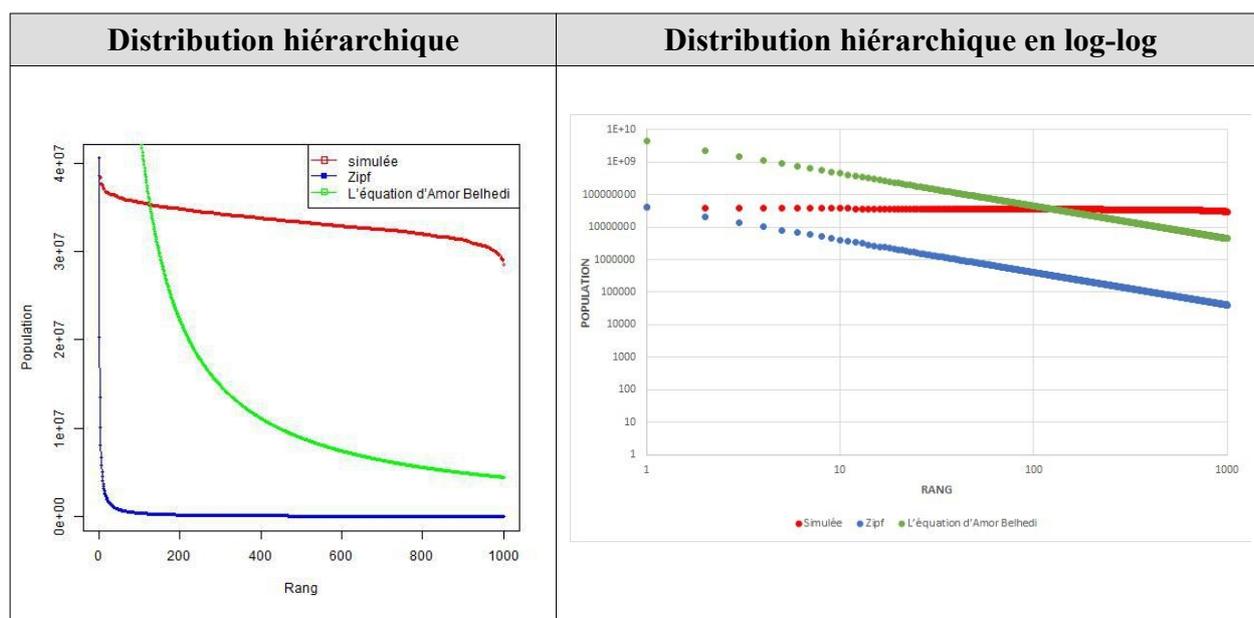


Figure 11: Comparaison aux distributions théoriques (modèle aléatoire). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi

Pour l'ensemble des simulations, avec une population initiale par ville de 250, le maximum de P1 (la plus grande ville) est de 13 milliards et la population minimale est de 1.5 milliard. Pour les simulations avec des populations initiales de 500, le maximum de P1 est 27 milliards et la population minimale est de quasiment 3 milliards.

La somme des écarts entre les distributions simulées et la rang-taille théorique selon Zipf, affiche des valeurs élevées (cf. Tableau 3). La somme des écarts minimum avec des simulations ayant pour population initiale des villes de 250 avoisine 1 milliard et le maximum avoisine les 10 000 milliards. Pour les simulations avec des populations initiales à 500, la somme des écarts minimum avoisine les 3 milliards et le maximum avoisine les 21 000 milliards.

La hiérarchie simulée est moins marquée qu'elle devrait l'être puisque l'écart entre la première et la dernière ville est moins important que dans les modèles théoriques. L'écart est de 551 329 pour un modèle avec une population initiale de 250, un taux de croissance naturelle de 0.5% et un taux de migration de 1%. Avec ces mêmes paramètres, l'écart entre la première et la dernière ville pour la distribution théorique est de 2 094 851. L'écart est de 1 338 321 pour un modèle avec une population initiale de 500, un taux de croissance naturelle de 0.5% et un taux de migration de 1%. Avec ces mêmes paramètres, l'écart entre la première et la dernière ville pour la distribution théorique est de 4 256 818.

L'interaction aléatoire ne produit donc pas de distribution hiérarchique de type rang-taille. Les écarts minimums à la théorie s'expliquent par une faible croissance naturelle (0.5%) et un faible taux de migration (1%) tandis qu'à l'inverse, des taux de migrations élevés (2%) vont donner les écarts maximums à la théorie. Pourtant les écarts ne sont pas proportionnels. Pour les simulations avec une population initiale de 250, quand le taux de croissance naturelle double, la somme des écarts est multipliée par 19. Alors que quand le taux de migration double, la somme des écarts est multipliée par 357. Le taux de migration semble être plus important que la croissance naturelle dans l'explication de la structuration hiérarchique de type rang-taille.

Population initiale : 250			Population initiale : 500		
Taux de croissance naturelle	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Taux de croissance naturelle	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue
0.5	1	1 783 538	0.5	1	3 577 792
0.5	1	1 783 049	0.5	1	3 577 980
0.5	1	1 784 436	0.5	1	3 576 157
0.5	1	1 784 101	0.5	1	3 578 172
0.5	1	1 783 235	0.5	1	3 576 984
0.5	2	608 530 895	0.5	2	1 226 212 256
0.5	2	609 280 341	0.5	2	1 224 344 180
0.5	2	608 680 654	0.5	2	1 225 836 124
0.5	2	608 621 400	0.5	2	1 225 886 027
0.5	2	608 767 524	0.5	2	1 225 643 269
1	1	33 056 934	1	1	65 699 348
1	1	33 052 089	1	1	65 737 933
1	1	33 066 120	1	1	65 689 591
1	1	33 039 655	1	1	65 712 758
1	1	33 057 745	1	1	65 680 878
1	2	10 668 990 570	1	2	21 301 903 238
1	2	10 665 876 298	1	2	21 319 513 035
1	2	10 667 552 795	1	2	21 284 676 954
1	2	10 668 128 163	1	2	21 323 500 079
1	2	10 675 618 407	1	2	21 307 671 446
1.5	1	599 868 162	1.5	1	1 196 019 946
1.5	1	600 376 961	1.5	1	1 196 502 434
1.5	1	600 583 104	1.5	1	1 196 433 894
1.5	1	600 175 072	1.5	1	1 196 115 906
1.5	1	600 155 800	1.5	1	1 196 748 665

Tableau 3: Étude de l'écart aux modèles théoriques (modèle aléatoire). Les écarts maximums en rouge et minimum en bleu

On obtient donc bien une hiérarchisation avec des échanges basés sur l'aléatoire, mais qui ne correspond pas au modèle théorique rang-taille, ni aux résultats de Gibrat avec son modèle de croissance aléatoire dont la logique est semblable, mais les paramètres de simulation différents.

Contrairement à Gibrat, le modèle « aléatoire » met en avant la migration entre les villes, même si les choix résidentiels sont pris aléatoirement, avec des taux de croissance naturelle fixes pour chaque ville. Gibrat ne propose pas de modéliser la croissance endogène et exogène. Ainsi, le modèle de Gibrat obtient un meilleur résultat avec la possibilité de faire varier les taux de croissance en fonction de la taille des villes.

## 2. Le modèle contribution

Le modèle contribution crée une hiérarchie beaucoup plus marquée que le modèle aléatoire. Il n'y a que quelques villes qui cumulent la croissance et se retrouvent donc au sommet de la hiérarchie. On observe que douze villes ont capté cette croissance tandis que les autres villes ont une taille quasiment similaire (cf. Figure 12).

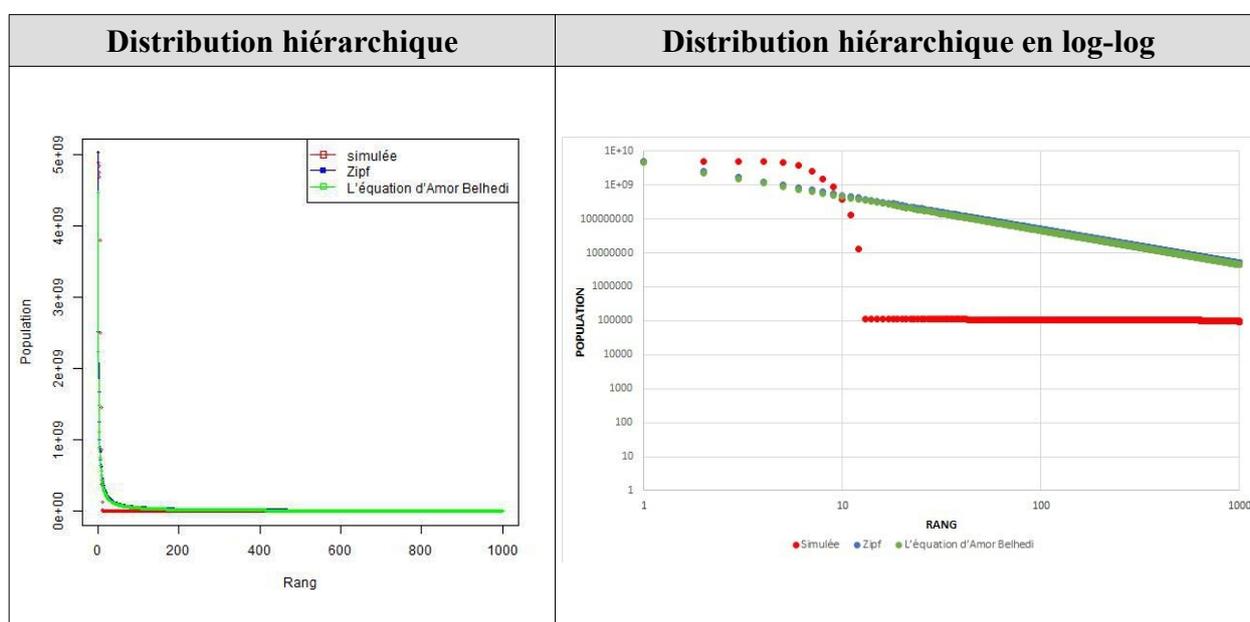


Figure 12: Distribution hiérarchique (modèle contribution). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi

Pour l'ensemble des simulations, avec une population initiale par ville de 250, le maximum pour P1 (la plus grande ville) est 1 651 milliards et la population minimale est de 4 425. Pour les simulations avec des populations initiales de 500, le maximum pour P1 est 3 302 milliards et la population minimale est 9 348. L'écart de population est donc important entre les premières et dernières villes.

À l'inverse du modèle d'interaction aléatoire, la hiérarchie obtenue est très marquée. L'écart entre la première et la dernière ville est légèrement plus marqué que dans le modèle théorique de Zipf. L'écart est de 292 679 286 pour un modèle avec une population initiale de 250, un taux de croissance naturelle de 0.5% et un taux de migration de 1%. Avec ces mêmes paramètres, l'écart entre la première et la dernière ville pour la distribution théorique est de 292 391 210. L'écart est de 623 040 376 pour un modèle avec une population initiale de 500, un taux de croissance naturelle de 0.5% et un taux de migration de 1%. Avec ces mêmes paramètres, l'écart entre la première et la dernière ville pour la distribution théorique est de 622 427 022.

Toutefois, tout comme pour le modèle aléatoire les distributions obtenues sont très loin de la loi rang-taille. Ce constat est confirmé par le Tableau 4 qui met en avant de forts écarts entre les populations simulées et théoriques. La somme des écarts minimum avec des simulations ayant pour population initiale des villes de 250 avoisine les 2 milliards, le maximum avoisine les 13 000 milliards. Pour les simulations avec des populations initiales à 500, la somme des écarts minimum avoisine les 4 milliards, le maximum avoisine les 26 000 milliards. Les populations simulées sont inférieures aux populations théoriques.

L'interaction influencée par la contribution de chaque ville aux interactions ne donne pas de distribution hiérarchique de type rang-taille. Tout comme pour le modèle aléatoire, le taux de migration explique les écarts avec la théorie, car il est le paramètre de la croissance urbaine qui influence le plus la structure hiérarchique finale. Pour les simulations avec une population initiale de 250, quand le taux de croissance naturelle double, la somme des écarts est multipliée par 18. Alors que quand le taux de migration double, la somme des écarts est multipliée par 334.

Population initiale : 250			Population initiale : 500		
Taux de croissance naturelle	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Taux de croissance naturelle	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue
0.5	1	2 273 413	0.5	1	4 713 768
0.5	1	2 118 933	0.5	1	4 520 123
0.5	1	2 323 882	0.5	1	4 493 808
0.5	1	2 329 059	0.5	1	3 277 216
0.5	1	2 276 877	0.5	1	4 328 862
0.5	2	735 752 335	0.5	2	1 539 015 261
0.5	2	844 379 062	0.5	2	1 621 489 559
0.5	2	760 606 589	0.5	2	848 595 965
0.5	2	745 881 600	0.5	2	1 571 441 535
0.5	2	720 485 650	0.5	2	1 531 885 006
1	1	41 330 050	1	1	80 786 009
1	1	41 912 236	1	1	82 221 676
1	1	40 778 092	1	1	82 491 566
1	1	42 489 186	1	1	82 873 205
1	1	41 001 746	1	1	82 623 931
1	2	13 012 352 166	1	2	27 372 699 931
1	2	13 318 024 591	1	2	25 233 715 424
1	2	9 818 065 866	1	2	26 724 824 215
1	2	13 543 208 512	1	2	26 572 076 182
1	2	13 404 841 492	1	2	25 288 511 248
1.5	1	632 661 332	1.5	1	1 466 175 484
1.5	1	747 252 834	1.5	1	1 566 586 041
1.5	1	730 528 103	1.5	1	1 448 006 098
1.5	1	720 731 360	1.5	1	1 481 684 249
1.5	1	739 607 897	1.5	1	1 345 461 007

Tableau 4: Étude de l'écart aux modèles théoriques (modèle contribution). Les écarts maximums en rouge et minimum en bleu

L'échange aléatoire fait émerger une faible hiérarchie, car les flux migratoires se font entre l'ensemble des villes. Globalement, aucune des villes du système ne tire les flux migratoires à son profit et ne maintient cette attractivité. À l'inverse, le modèle contribution donne des

distributions hiérarchiques marquées. Quelques villes vont attirer la croissance exogène et de fait, maintenir cette dynamique ce qui est inhérent au modèle qui favorise les villes attractives. Même si elles ne collent pas aux modèles théoriques, on retrouve des hiérarchies très marquées avec très peu de grandes villes et beaucoup de petites.

***L'interaction aléatoire ou déterminée par la contribution des villes donne des hiérarchies qui ne sont pas des rang-taille.*** On a voulu creuser pour voir s'il existe une stabilité des résultats : les rangs hiérarchiques des villes restent-ils les mêmes au cours de la même simulation ou à l'inverse la structure hiérarchique évolue-t-elle sans cesse au cours d'une simulation ?

### 2.1.8 La hiérarchie : une structure stable

Nous voulons savoir si la structure et l'organisation hiérarchique des villes simulées se déterminent et se fixent rapidement. Une ville qui a une croissance démographique supérieure aux autres villes du système garde-t-elle sa place dominante ? La question qu'on se pose est alors de savoir si les premières interactions vont expliquer la position hiérarchique finale de chaque ville.

Pour y répondre, il suffit d'obtenir la variation des rangs R de chaque ville au fil de la simulation. Le calcul fait est un calcul de taux d'évolution classique avec :

$$((Ra - Rd) / Rd) * 100 \quad \text{où } Ra = \text{Rang d'arrivé, et } Rd = \text{Rang de départ.}$$

La moyenne des taux d'évolution est ensuite calculée pour chaque année et pour toutes les simulations. Une moyenne basse traduit le fait que les villes ne changent pas ou peu de place dans la hiérarchie et à l'inverse, une moyenne élevée correspond à de grandes variations dans la position hiérarchique des villes au cours de simulations. Le deuxième cas illustre le fait qu'il y ait une forte « concurrence » entre les villes et un écart assez faible de population entre celles-ci puisqu'il est alors « facile » pour une ville de gagner ou perdre des rangs hiérarchiques d'une année sur l'autre.

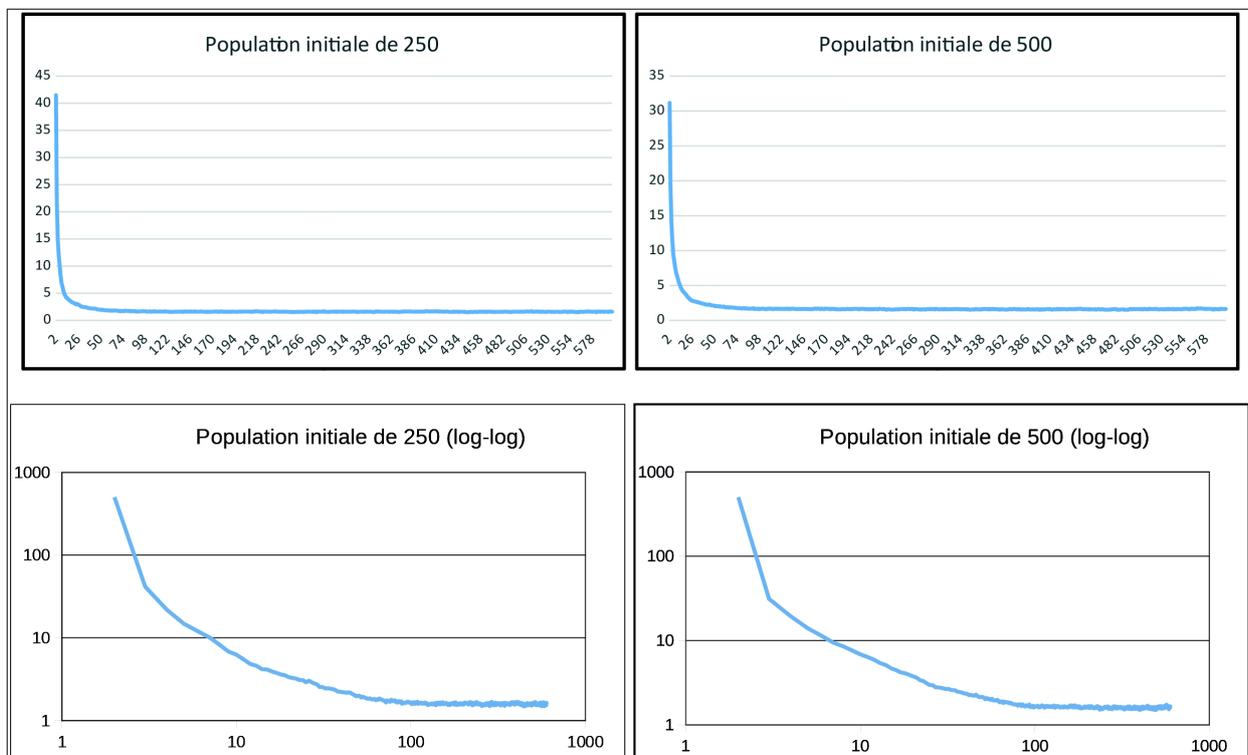


Figure 13: Moyenne des taux de variations des villes selon leur rang (modèle aléatoire)

Pour le modèle aléatoire, les courbes tracées en fonction des moyennes des taux de variation des villes rapportées aux années simulées illustrent une certaine stabilité de la structure. L'organisation hiérarchique des villes se fixe assez rapidement puisque dès les premières années simulées la moyenne descend en dessous de 5. Ensuite, les taux de variation restent constants jusqu'à la fin des simulations.

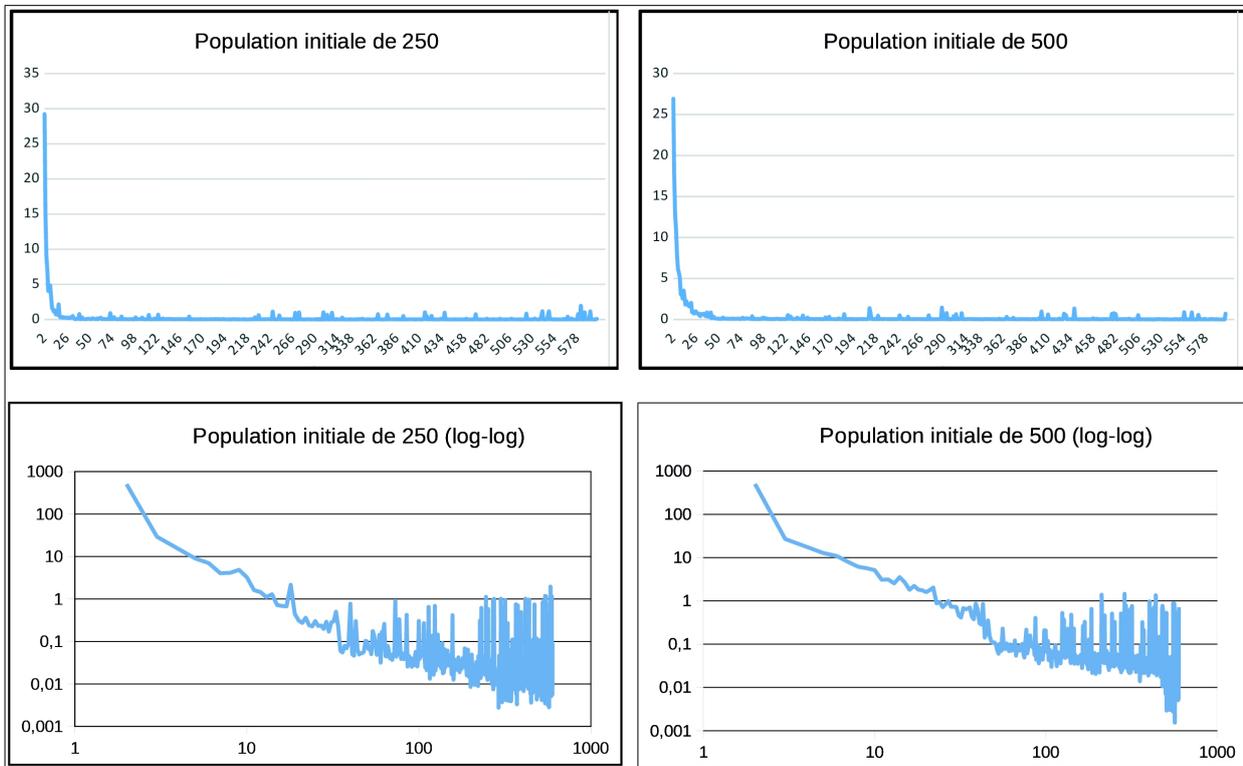


Figure 14: Moyenne des taux de variations des villes selon leur rang (modèle contribution)

L'étude de l'évolution des moyennes des taux de variation pour le modèle contribution amène à des conclusions similaires au modèle aléatoire. Les taux de variation baissent très rapidement au cours de la simulation. On obtient des moyennes inférieures à celles obtenues dans le modèle aléatoire, puisque la moyenne des variations tombe en dessous de la valeur 1. Il y a très peu de variations de rang, car les villes attractives maintiennent leur dynamisme et ne voient pas leur place hiérarchique évoluer ce qui est certes propre à la logique même du modèle, mais correspond à une réalité. Les villes les plus dynamiques gardent leur attractivité par l'intermédiaire des économies d'échelle qui favorisent l'arrivée de nouveaux capitaux et de main-d'œuvre (Marshall, 1890).

**On observe que pour les deux modèles de simulations (aléatoire et contribution), la hiérarchie se fixe rapidement. Il y a relativement peu de variations de rang entre les villes au cours de la simulation.** Nous pouvons noter une différence concernant la moyenne du taux d'évolution qui est plus petite pour le modèle contribution. De plus, dans le modèle contribution, l'évolution y est moins régulière que pour le modèle aléatoire. Les villes qui vont rapidement capter la croissance vont garder cette dynamique. Leur statut de villes attractives est maintenu et leur place hiérarchique n'est pas modifiée. Les variations se jouent entre les villes ayant une faible différence de population. Les faibles croissances de la moyenne représentent le moment où certaines villes principalement du bas de la hiérarchie vont dépasser leurs concurrentes. La

différence de taille est moindre ce qui leur permet par la croissance naturelle de gagner des places hiérarchiques. Pour le modèle aléatoire, la faible différence de taille entre toutes les villes explique le fait que la variation est plus régulière, car elle se fait tout au long de la simulation et concerne quelques villes en compétition.

### **2.1.9 La position hiérarchique est fonction de l'échange**

Après avoir étudié la variation des rangs des villes au cours des simulations, nous avons cherché à expliquer le rang obtenu pour une ville en étudiant les relations statistiques entre la population finale de la ville, son rang hiérarchique, le nombre d'interactions qu'elle a eu, et le classement qui consiste à classer les villes selon leur contribution aux échanges sur la totalité de la simulation. Ont été calculées :

1. Une corrélation avec la méthode de Pearson qui étudie la dépendance entre la population finale et le nombre d'interactions.
2. Une corrélation avec la méthode de Spearman qui étudie le lien statistique entre des rangs. Ici le rang final et le classement.
3. Une corrélation avec la méthode de Pearson qui étudie le lien statistique entre le nombre d'échanges et le rang final. Les résultats de cette corrélation vont être négatifs. Cela s'explique par le fait que plus on échange, plus il est probable que la ville soit au sommet du classement donc avec une valeur de rang faible.

#### **1. Modèle aléatoire**

Au vu des différentes distributions obtenues pour le modèle aléatoire, on constate l'absence de corrélations, ce qu'illustrent pour l'exemple les trois nuages de points ci-dessous. Il n'existe donc pas de dépendance statistique entre la population finale et le nombre d'échanges ni entre le classement et le rang, ou le nombre d'échanges avec le rang.

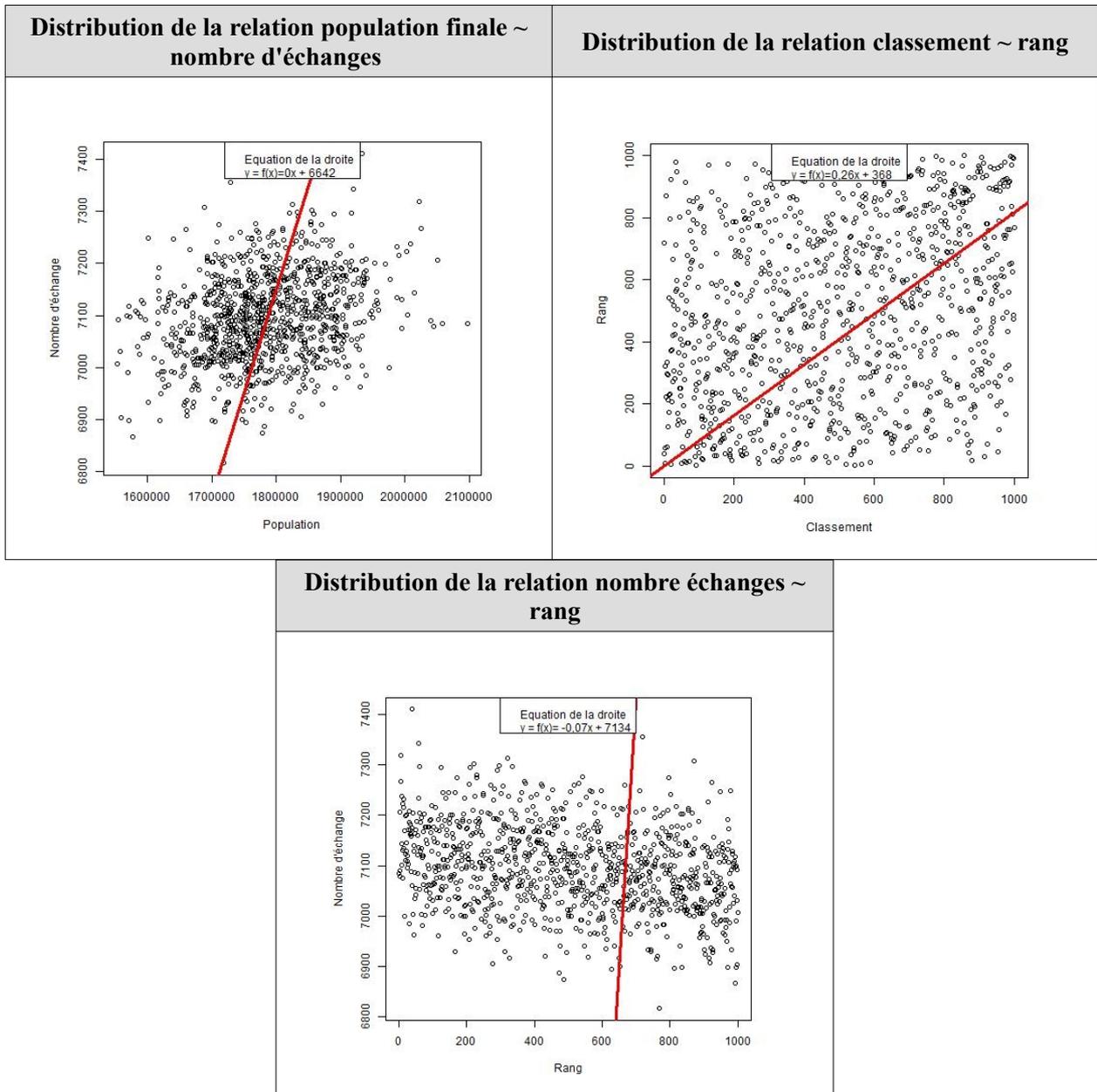


Figure 15: Distribution graphique des principales relations statistiques (modèle aléatoire)

Les corrélations statistiques confirment l'analyse graphique.

	Population finale ~ Nombre d'interaction	Rang ~ Classement	Échange ~ Rang
Max	0.30	0.30	-0.09
Min	0.08	0.06	-0.33
Moyenne	0.20	0.19	-0.21

Tableau 5: Corrélation (modèle aléatoire)

## 2. Modèle contribution

Pour le modèle contribution, on observe sur les graphiques ci-dessous l'existence de deux relations de dépendance : entre la population finale et le nombre d'échanges puis, entre le classement et le rang.

Ces relations statistiques sont imputables à l'algorithme qui régit l'interaction entre les villes et qui favorise les villes qui contribuent aux interactions.

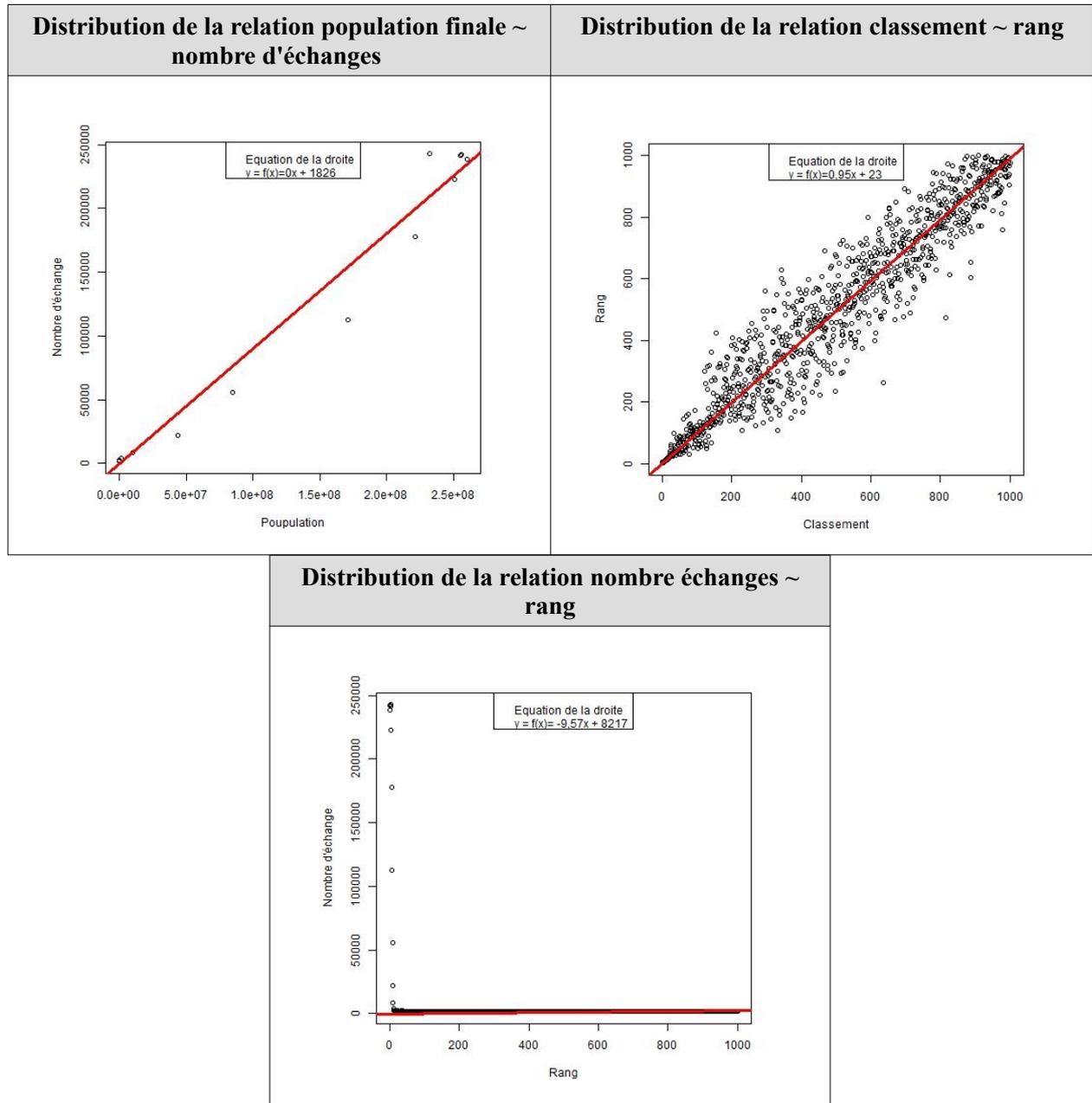


Figure 16: Distribution graphique des principales relations statistiques (modèle contribution)

Dans le tableau ci-dessous, on peut lire une forte corrélation entre l'interaction et la position hiérarchique finale (avec une moyenne de 0.99).

	Population finale ~ Nombre d'interaction	Rang ~ Classement	Échange ~ Rang
Max	0.99	0.93	-0.11
Min	0.74	0.16	-0.49
Moyenne	0.99	0.65	-0.17

Tableau 6: Corrélation (modèle contribution)

Ce résultat n'est pas surprenant puisque ce modèle favorise la croissance, ou du moins la croissance exogène des villes qui contribuent le plus à l'interaction. Il est donc tout naturel d'observer que ces variables s'influencent et évoluent de la même manière.

La corrélation entre la position dans la hiérarchie finale et la contribution aux échanges est bien plus marquée pour le modèle contribution. Ce résultat n'est pas surprenant du fait que l'algorithme favorise les villes qui contribuent le plus aux interactions globales du système. Si l'interaction aléatoire crée une hiérarchie, celle-ci est globalement moins marquée. La croissance exogène étant alors distribuée aléatoirement et non pas en fonction de la contribution aux interactions, il n'existe pas de corrélation entre interaction et rang hiérarchique. Pour l'interaction aléatoire, le rang hiérarchique est alors causé par la quantité d'individus de chaque flux migratoire et non pas par le nombre de flux migratoire.

#### 2.1.10 Constats et conclusions sur les impacts de logiques a-spatiales d'interactions sur la hiérarchie des systèmes de villes

Les sorties des modèles « aléatoire » et « contribution » simulant la croissance d'un système de villes fictif sur la base d'échanges entre villes n'ayant aucune logique spatiale ont montré :

- Qu'une hiérarchie entre les villes apparaît systématiquement. Elle est peu marquée pour la logique aléatoire, et l'est beaucoup plus pour la logique « contribution » pour laquelle quelques villes accaparent la croissance, le reste se développant péniblement grâce à la croissance naturelle. Ni l'une ni l'autre des configurations ne correspondent à la réalité même si le modèle contribution irait dans le sens de la métropolisation dans laquelle quelques lieux attirent les ressources.
- Que dans les deux logiques d'interaction les hiérarchies obtenues ne correspondent en rien à une distribution type rang-taille qui elle-même n'est pas vérifiée partout. Les hiérarchies obtenues ne sont pas crédibles par rapport à l'observation empirique.
- Que ces deux modèles ne permettent pas de reproduire l'organisation des systèmes de villes empiriques. Les simulations réalisées permettent donc de montrer que l'hypothèse selon laquelle des échanges aléatoires, ou pour lesquels l'attractivité des villes dépendrait de leur contribution aux échanges préalables, suffiraient à expliquer l'émergence de structures hiérarchiques type rang-taille, est fautive. Dit autrement, la Géographie semble compter dans la structuration des systèmes de villes, très vraisemblablement à travers le rôle de friction aux interactions que joue la distance.

Il est alors nécessaire de mesurer l'impact de la distance (mesurable via différentes unités : kilomètres, temps, topologique) sur l'intensité des interactions et donc *in fine* sur la structuration des systèmes de villes. Ce sera l'objet des prochaines simulations. Plus précisément, il va s'agir dans la continuité de notre démarche « pas à pas » de reprendre les modèles vus précédemment en y intégrant l'anisotropie de l'espace due aux réseaux de transport qui vont générer des coûts

spatialement différenciés pour l'échange, et d'étudier l'impact de cette logique spatiale des interactions sur la hiérarchie des systèmes de villes simulés.

## **2.2 Intégrer la friction de l'espace dans la logique des interactions permet-il de produire des systèmes hiérarchisés de villes de type rang-taille ?**

Les interactions dans le monde réel ont un coût fonction (pas forcément linéaire) du degré de séparation des lieux qui échangent, ce qui est à l'origine de la loi de Tobler selon laquelle ce qui est proche interagit plus que ce qui est lointain (Tobler, 1970). Aussi, il paraît naturel d'intégrer au modèle ce rôle de friction aux échanges que joue la distance, quelle qu'en soit l'unité de mesure. Les échanges se déroulant concrètement via des réseaux de transport, il va donc s'agir d'intégrer l'anisotropie liée aux réseaux de transport qui redéfinissent « le capital spatial » des lieux (notamment en termes d'accessibilité).

### **2.2.1 Réseaux de transport et systèmes de villes**

Simuler la croissance des villes sur la base de logiques d'interaction a-spatiales permet de produire des systèmes de villes hiérarchisés, mais qui s'éloignent fortement des distributions empiriques type rang-taille. Ce premier travail a été réalisé dans la perspective d'avoir un point de repère. Sur cette base, il va à présent s'agir d'intégrer une approche plus géographique en conditionnant l'attractivité des villes à leur accessibilité dans l'espace réseau. Pour une ville  $i$ , l'attractivité d'une ville  $j$  au temps  $t$  va dépendre de sa contribution aux échanges réalisés préalablement, comme dans le modèle « contribution », mais aussi de sa proximité.

Ce rôle de friction aux échanges joué par la distance est bien connu en Géographie. Il est à la base même du modèle gravitaire (Reilly, 1931). L'objectif ne va pas consister à une nouvelle fois tenter de calibrer au mieux un modèle gravitaire des échanges entre lieux sur la base de flux observés, mais d'analyser si, en intégrant la friction de la distance à notre modèle, il est possible de générer des hiérarchies urbaines qui se rapprocheraient davantage des hiérarchies empiriques types rang-taille et de mieux comprendre les liens entre structure des réseaux de transport et systèmes de villes. On étudiera plus particulièrement le rôle de la structure morphofonctionnelle des réseaux : quelle influence ont des réseaux plus ou moins connectifs, plus ou moins rapides, à l'intermédiarité plus ou moins bien distribuée, sur les hiérarchies de villes obtenues ?

Pour réaliser ces explorations, nous construisons un nouveau modèle : le modèle « spatial » ou « d'interaction spatiale ». Le modèle « a-spatial » exposé en première partie a été recréé sous la plateforme de Système Multi-Agents *Netlogo* afin de pouvoir prendre en compte les réseaux de transport. Cette plateforme permet aussi d'intégrer l'autonomie des agents, les individus qui se déplacent, qui vont prendre leur décision individuellement en fonction de leur perception de leur environnement.

### **2.2.2 Un modèle Netlogo pour appréhender les interactions réseau de transport - systèmes de villes**

Avoir recours au SMA, comme nous l'avons vu préalablement, permet d'intégrer à la fois l'individu et son environnement spatial. C'est un outil précieux pour explorer diverses hypothèses et étudier dans toutes leurs dimensions les systèmes complexes adaptatifs que sont les systèmes de villes.

Notre modèle a été construit sur la plateforme libre *Netlogo*<sup>7</sup> avec la version 6.0.2 en ayant recours à plusieurs extensions. La première est l'extension « *Matrix* »<sup>8</sup> qui permet de faire des calculs matriciels. La seconde est l'extension « *Network* »<sup>9</sup> utilisée pour la construction des réseaux et le calcul de plus courts chemins.

Ce nouveau modèle est proche du modèle a-spatial d'interaction. On considère un système fictif de villes en faisant cette fois l'hypothèse selon laquelle la croissance d'une ville va dépendre de sa contribution préalable aux échanges, comme précédemment, mais aussi de sa position au sein du réseau de transport qui va la rendre plus ou moins accessible. L'hypothèse de base, triviale, étant que le coût d'un échange va être d'autant plus élevé que les villes qui interagissent sont distantes en distance réseau. Un individu sera donc d'autant plus enclin à interagir avec une ville du fait qu'elle est proche et que le déplacement sera donc peu coûteux.

Pour ce modèle *Netlogo* qui intègre le rôle de la distance dans les choix d'interaction, les jeux migratoires sont simulés entre 441 villes. Il y a deux raisons à ce nombre de villes. Premièrement, ce nombre initial de villes modélisées a été diminué par rapport au modèle « a-spatial », car ce nouveau modèle demande beaucoup plus de puissance de calcul et entraîne des saturations de mémoire, causées principalement par l'extension « *Network* » qui est génératrice de nombreux *threads* (qui représentent une exécution) au cours des simulations. Les conséquences sont alors d'atteindre la limite de mémoire disponible alloué aux programmes et de causer l'arrêt de la simulation. Deuxièmement, ce nombre est proche de celui retenu par Pumain, Bretagnolle et Rozenblat pour l'étude des trajectoires des villes entre 1600 et 1990 (Pumain, Bretagnolle, Rozenblat, 1999), tout en permettant une configuration spatiale, pour certaines simulations, selon un quadrillage homogène du « Monde » par les villes selon un carré de  $21 \times 21$  .

Le modèle fonctionne comme suit : à chaque tour de simulation, un certain pourcentage d'individus (les agents Walks) qui composent les villes initiales doit choisir une destination. L'attractivité  $A_i$  de la ville  $i$  sur un individu de la ville  $j$  va dépendre :

- de la contribution aux échanges  $F_i$  de  $i$  : comme précédemment, pour une ville  $i$ , la contribution aux échanges  $F_i$  est égale à  $F_i = ni / N$  , avec  $N$  le nombre d'échanges ayant eu lieu entre toutes les villes du système depuis le début de la simulation et  $ni$  le nombre d'échanges (émis et reçus) concernant la ville  $i$ .

- de la distance  $D_{ij}$ , qui est calculée selon une logique de plus court chemin. Dans un premier temps, nous considérons des distances topologiques, c'est-à-dire le nombre d'arcs minimum reliant  $i$  à  $j$ , afin de tester l'influence de la topologie du réseau. Dans un second temps, la distance est exprimée en temps (*longueur de l'arc / vitesse de circulation*) afin d'étudier le rôle de l'unité de mesure de la séparation des lieux sur la structure hiérarchique des villes.

L'attractivité de la ville  $i$  étant donc donnée par  $A_i = F_i / D_{ij}$  .

Ce modèle reprend donc la logique gravitaire (Reilly, 1931), car les agents choisissent leur destination en fonction de l'attractivité des lieux et de leur éloignement, la différence étant ici que l'attractivité ne dépend pas comme dans le modèle gravitaire de la taille de la ville, mais de sa contribution aux échanges. Pratiquement un individu d'une ville  $i$  va donc choisir la ville  $j$  qui maximise  $A_i$  .

<sup>7</sup> <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

<sup>8</sup> <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/matrix.html>

<sup>9</sup> <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/nw.html>

Désormais, l'attractivité pour l'ensemble des villes est calculée à la suite de chaque migration individuelle. Ainsi, au cours d'une même année simulée, l'attractivité relative des villes entre elles peut varier ce qui a pour conséquence d'éviter que tous les individus d'une ville  $i$  aillent dans la même ville  $j$  (celle qui est la plus proche).

### 2.2.3 Diagramme UML du modèle d'interaction spatiale

Le diagramme de classes du modèle d'interaction spatiale illustre l'importance nouvelle du réseau de transport dans les simulations. Le réseau de transport est discriminant puisqu'il peut donner des potentiels d'interaction inégaux entre les villes. Elles n'ont pas toutes le même capital spatial au début des simulations.

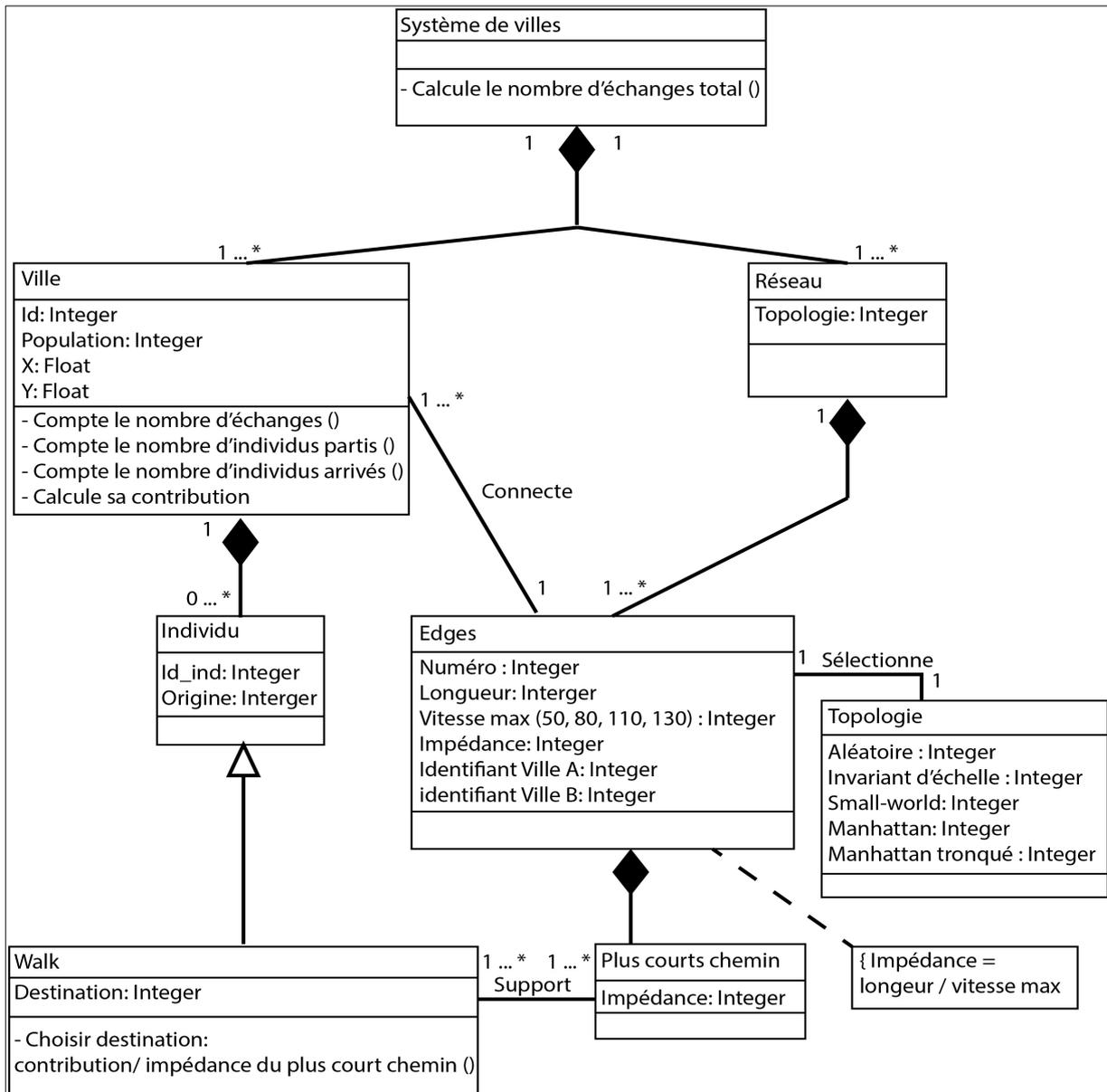


Figure 17: Diagramme de classe du modèle d'interaction spatiale

Voici le diagramme d'activité du modèle d'interaction spatiale. L'interaction entre les villes repose sur les migrations des agents « Walks ». Le choix de la ville vers laquelle migrer est fonction des distances réseau et de la contribution aux interactions.

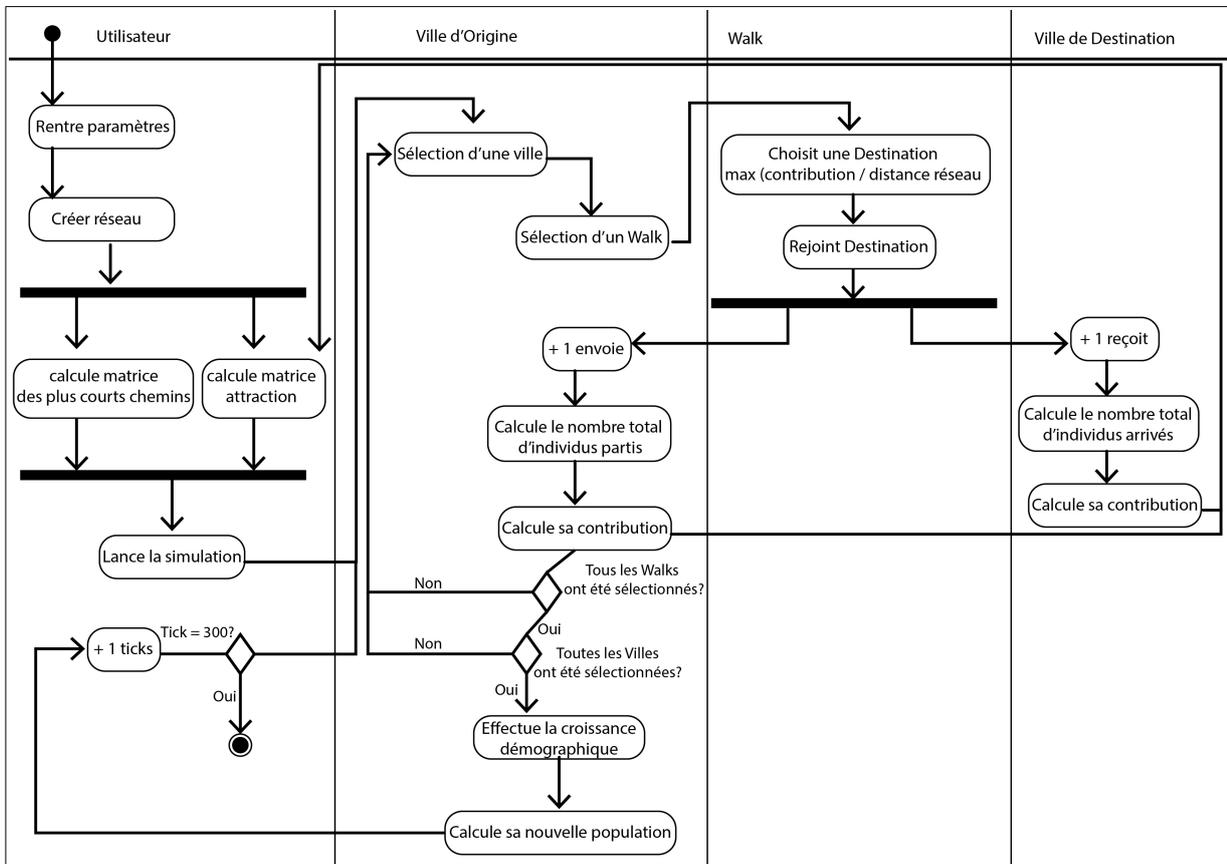


Figure 18: Diagramme d'activité du modèle d'interaction spatiale

## 2.2.4 Plan d'expérience

Dans ce paragraphe nous détaillons le plan d'expérience mis en place pour explorer les relations réseau de transport-système de villes.

Par rapport aux simulations précédentes, le plan d'expérience va en plus faire varier la répartition spatiale des villes et les topologies et caractéristiques fonctionnelles des réseaux de transport.

Les réseaux de transport utilisés et les systèmes de villes obtenus sont décrits à l'aide de la théorie des graphes. La théorie des graphes permet l'analyse de graphes qui sont constitués de sommets (ou nœuds) reliés par des arcs (liens) (Kansky, 1963, 1989 ; Haggett et al. 1969). Ici les sommets correspondent aux villes et les arcs aux tronçons des réseaux de transport, comme les routes.

### 2.2.4.1 Tester différentes répartitions spatiales des villes

Dans le plan d'expérience ont été testés les effets de deux types d'agencement des villes :

- 1- un agencement homogène,
- 2- un agencement hétérogène des villes.

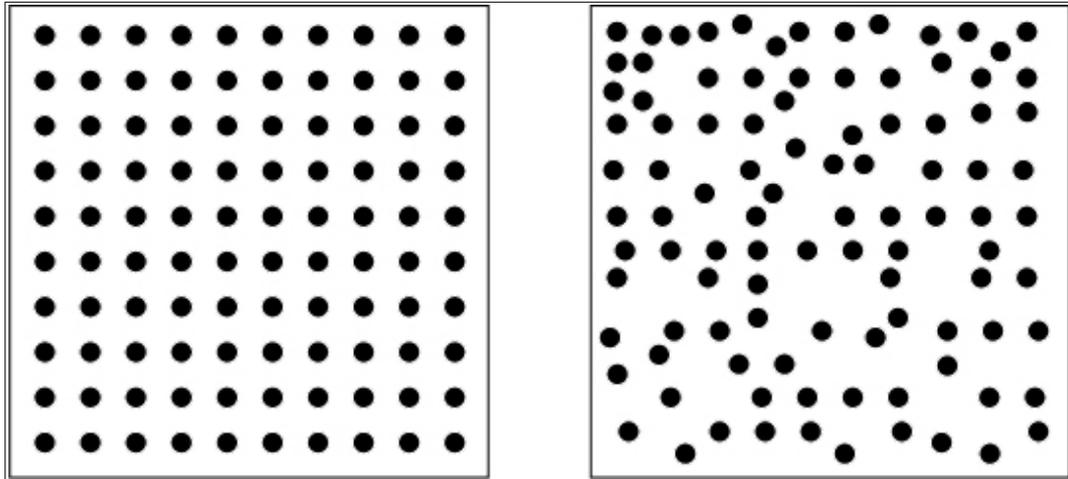


Figure 19: Distribution schématique de l'agencement des villes : homogène à gauche et hétérogène à droite

Ces deux configurations stylisées ont été utilisées pour étudier l'effet du semis initial des villes sur les configurations hiérarchiques obtenues.

Les villes de ces deux configurations ont été connectées à l'aide de différents réseaux théoriques types afin d'en tester l'influence sur la hiérarchie.

### 2.2.4.2 Tester l'influence de la structure des réseaux de transport

Tout d'abord, il convient de préciser que les réseaux de transport modélisés correspondent à des graphes non-orientés, c'est-à-dire que les liens permettent une circulation des agents dans les deux sens. Les systèmes étudiés sont par ailleurs connexes, c'est-à-dire qu'il existe un chemin permettant de joindre n'importe quel sommet (ville) du graphe au départ de n'importe quel autre sommet. La théorie des graphes va notamment permettre de décrire la connectivité des réseaux, la centralité des lieux ou encore l'accessibilité :

- La centralité : la centralité renvoie à la position d'un sommet, ici une ville, par rapport aux autres dans un graphe. Un sommet est central si un grand nombre de plus courts chemins y transitent (Bavelas, 1948). Les simulations se basant sur les distances topologiques vont étudier l'impact de la centralité sur les croissances différentielles. En effet, le fait de modéliser et simuler des échanges à partir d'un système de villes connectées par l'intermédiaire d'un réseau de transport permet d'intégrer la notion de centralité. La forme et la structure du réseau de transport donnent une situation plus ou moins avantageuse pour certaines villes. Une ville ayant de nombreuses connexions directes aux autres villes aura un potentiel d'interaction bien supérieur à une ville en « bordure » de réseau n'ayant qu'une connexion directe à une ville. La forme va influencer l'interaction et donc la capacité de chaque ville à capter la croissance exogène. On s'attend à voir les villes les plus centrales croître au détriment des autres. Isoler l'étude de la

centralité permet de n'étudier que les effets de la structure du réseau en éliminant les propriétés fonctionnelles propres des arcs (longueur et vitesse).

- L'accessibilité : elle correspond à facilité à accéder à des lieux ou des ressources localisées (population, emplois, services) depuis une localisation donnée, en un temps donné, avec un mode de transport donné (Handy, Niemeier, 1997). On peut calculer l'accessibilité topologique ou fonctionnelle selon la métrique choisie (distance, temps, énergétique, etc.).

Chaque configuration de réseau utilisée présente des spécificités induites par sa topologie, et ses fonctionnalités (vitesse sur les arcs par exemple). Ces réseaux sont décrits par des indices classiques de la théorie des graphes (Kansky, 1963 ; Haggett et *al.* 1969) repris du groupe fmr<sup>10,11</sup> que nous introduisons ci-dessous :

- Le diamètre : cette mesure renvoie au plus long des plus courts chemins. Elle permet de donner une indication de « l'extension du réseau ».
- $v$  : le nombre de villes du réseau.
- $e$  : le nombre d'arcs du réseau.
- $p$  : le nombre de composantes connexes.
- $M$  : la longueur totale du réseau.
- $sp$  : la longueur du plus long de tous les plus courts chemins depuis ou vers les sommets du réseau.
- Le nombre cyclomatique ( $\mu$ ) : plus ce nombre est élevé plus le réseau est dense, connectif, c'est-à-dire qu'il existe de nombreuses alternatives pour joindre deux villes.

$$\mu = e - v + p$$

- Beta : L'indice beta traduit la connectivité du réseau, c'est-à-dire la complétude du graphe. Il est fonction du nombre de liaisons directes entre les sommets.

$$\beta = e/v$$

- Degré de connectivité : Il traduit la densité, mais aussi la complétude du graphe.

$$\text{Degré de connectivité} = v \times (v - 1) \times 1/2 (e)$$

- Indice de Shimbel : L'indice de Shimbel mesure l'accessibilité d'un sommet en fonction du cumul des distances le séparant de tous les sommets du graphe. Plus ce nombre est faible plus le sommet est accessible. Pour le mesurer, il faut établir la matrice des plus courts chemins puis, pour « chaque sommet on calcule l'indice de Shimbel qui est égal au nombre d'arêtes qu'il faut, à partir d'un sommet donné, pour rejoindre chacun des autres sommets du réseau par les plus courts chemins » (Gleyze, 2001). L'indice de Shimbel peut être topologique ou métrique.

$$\text{Indice de Shimbel} = (\sum_i \sum_j D(ij)) / (\sum_i D(ij))$$

où  $D_{ij}$  représente la distance entre les sommets  $i$  et  $j$ .

- Eta : Longueur moyenne des arcs.

$$\eta = M / e$$

---

10 <https://groupefmr.hypotheses.org/>

11 <https://groupefmr.hypotheses.org/3740>

- $P_i$  : correspond à la longueur totale du réseau divisée par le plus long des plus courts chemins kilométriques.

$$P_i = M / \max(sp)$$

- Moyenne des plus courts chemins (Moyenne  $sp$ ) : Cet indicateur permet d'avoir une vue d'ensemble sur la bonne transitivity qui est le fait d'avoir peu d'intermédiaires entre chaque couple de villes. La valeur obtenue diffère de  $E_t$  dans le sens où  $E_t$  illustre plus une configuration globale tandis que la Moyenne  $sp$  se concentre sur les plus courts chemins.

$$\text{Moyenne } sp = \bar{x}(sp)$$

Des réseaux théoriques « types » ont été créés afin de contrôler leurs propriétés topologiques, ce qui est beaucoup plus difficile avec des réseaux empiriques qui ne sont jamais des idéaux types à la métrique bien définie, mais des « mélanges ». Chaque réseau mobilisé a ses caractéristiques propres : ils sont plus ou moins denses, connectifs, fournissent une qualité d'accessibilité globale variable, des accessibilités nodales plus ou moins homogènes et une plus ou moins grande transitivity. La transitivity renvoie au *clustering*, coefficient qui traduit les relations entre trois sommets ; si le coefficient est fort alors il existe un arc connectant chacun des sommets<sup>12</sup>. Une forte transitivity traduit alors le fait d'avoir peu d'intermédiaires entre chaque couple de villes. La transitivity traduit le fait d'être connecté au même sommet qu'un sommet auquel je suis connecté, donc « les amis de mes amis sont mes amis » (Trolliet *et al*, 2020).

Les réseaux types modélisés et utilisés dans les simulations et qui connectent toujours un semis de 441 villes sont les suivants :

1. **Réseau aléatoire** : il s'agit d'un réseau connectif, assez dense (1508 arcs), pour lequel les liens entre sommets ont été choisis aléatoirement, donc sans aucune intention « planificatrice ».
2. **Réseau Manhattan** ou quadrillé : pour ce type de réseau (840 arcs), l'accessibilité est homogène (un peu plus faible sur les bordures). C'est le réseau pour lequel les distances se rapprochent le plus des distances euclidiennes. Ce réseau est rarement présent dans l'aménagement du territoire, mais correspond à un idéal type relevant d'une politique d'équité.
3. **Réseau de Manhattan tronqué** : c'est un réseau de Manhattan auquel ont été enlevés aléatoirement 84 arcs. Il a donc la même logique en termes d'accessibilité que le réseau de Manhattan, mais dans une version un peu dégradée (756 arcs). Ce faible nombre d'arcs arbitrairement enlevés est justifié par la volonté de ne pas modifier profondément la nature du réseau, mais d'étudier si une légère modification de sa structure peut entraîner des différences notables sur la hiérarchie.
4. **Réseau Small world** (petit monde) : ce type de réseau est issu des travaux de Stanley Milgram (Milgram, 1967). À l'état initial, le graphe a des sommets qui ont le même degré (nombre de liens directs avec un autre sommet) et chaque sommet est relié à ses plus proches voisins. Puis, progressivement, des liens sont retirés et placés aléatoirement ailleurs. Un *small-world network* est donc un réseau connexe et connectif et où la distance moyenne entre paires de sommets est faible, avec peu d'intermédiaires entre chaque paire de sommets. Un réseau *small-world* permet une bonne circulation des

<sup>12</sup> <https://groupefmr.hypotheses.org/3221>

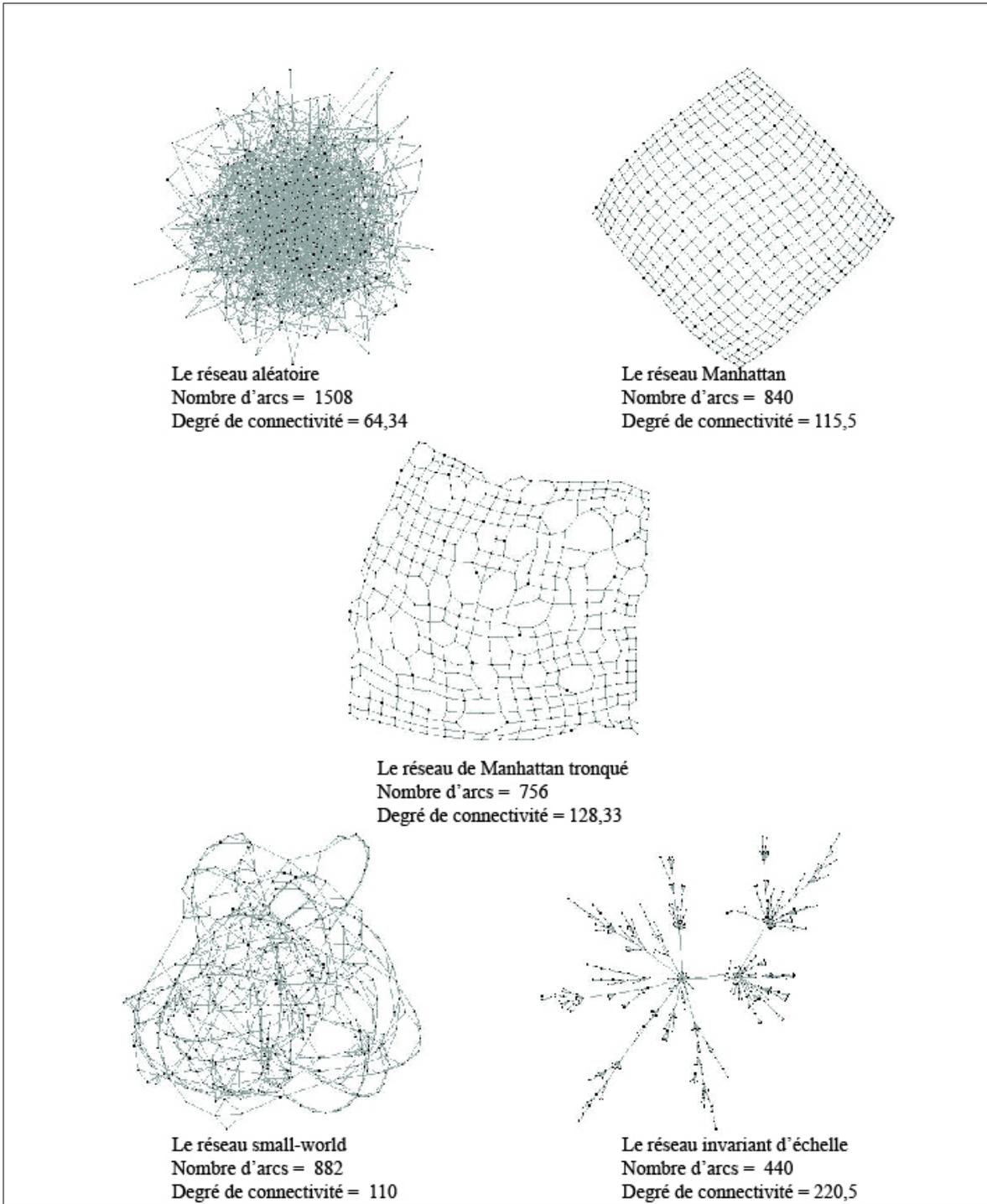
personnes, biens ou informations du fait du nombre restreint d'intermédiaires entre chaque couple de villes. Ce réseau type (ici avec 882 arcs) permet d'étudier les conséquences sur la hiérarchie d'un réseau dans lequel il est facile pour un individu de rejoindre n'importe quelle ville du système et ce en passant par peu d'intermédiaires ; aucune ville n'a réellement une position privilégiée par rapport aux autres.

5. **Réseau invariant d'échelle** (Barabasi, Albert, 1999) : il s'agit d'un réseau pour lequel les sommets et leurs degrés sont reliés par une loi de puissance. Il y a donc très peu de sommets très bien connectés (les « *hubs* »), davantage de moyennement connectés et énormément de peu connectés. Ce type de réseau est basé sur la notion de « *preferential attachment* ». Lors de la construction d'un réseau invariant d'échelle, un sommet va chercher à se connecter en priorité à un autre sommet qui possède déjà une forte nodalité. Avec ce type de réseau, l'intermédiarité (probabilité pour un sommet de se situer sur de nombreux plus courts chemins du réseau) va être très concentrée sur les *hubs*, qui constituent des « passages obligés » sur les plus courts chemins entre de nombreuses paires de sommets. Avec ce type de réseau, il y a donc beaucoup d'intermédiaires entre paires, car le réseau est peu connectif (440 arcs). Ce réseau type a été retenu dans ce travail afin d'étudier les effets de fortes inégalités de connexion sur la concentration de la population. Cette topologie de réseau est l'inverse d'une structure prônant l'équité spatiale.

Il est important de préciser que la représentation graphique des réseaux utilisés pour les simulations n'est que « schématique », car elle correspond à des graphes non-planaires. Quand deux arcs se croisent, il n'y a pas nécessairement un sommet (cf. figure 20). En effet, ces réseaux sont créés via le package « *Igraph* »<sup>13</sup> sous R. Il permet de s'assurer que les règles topologiques qui président à leur construction sont respectées, mais pas que les réseaux soient planaires. L'important est ici de contrôler les caractéristiques topologiques et fonctionnelles des réseaux pour être ensuite en mesure de tester l'effet de ces caractéristiques sur la dynamique des systèmes de villes. Cela se fait au détriment de la représentation graphique des réseaux qui peut « dérouter ». Ce ne sont pas des représentations graphiques planaires où chaque ville du réseau serait à sa « place » dans l'espace euclidien tout en respectant la longueur des arcs.

---

13 <https://igraph.org/>



*Figure 20: Les cinq réseaux modélisés*

Ainsi, à l'aide de ces idéaux types de réseau, nous allons par exemple chercher à cerner l'impact sur la hiérarchie urbaine : de la densité du réseau Aléatoire, de l'homogénéité de l'accessibilité du réseau de Manhattan, de la bonne transitivity du réseau Small world ou encore de l'influence des inégalités de centralité et d'intermédierité propres au réseau Invariant d'échelle.

### 2.2.4.3 Tester l'influence du type de distance considéré : graphe non-valué et graphe valué

Pour tester l'influence de la friction de la distance sur les interactions et *in fine* sur la hiérarchie du système de villes, deux mesures de distance ont été utilisées :

1. La distance topologique, qui mesure le nombre d'arcs à traverser pour rejoindre une destination au départ d'une origine. On mobilise ici un graphe non-valué (tous les arcs valent 1). L'idée est de tester l'influence de la structure du réseau, pas de ses fonctionnalités.
2. La distance-temps qui mesure le temps nécessaire pour joindre deux villes du réseau. On mobilise ici un graphe valué pour lequel chaque arc a une valeur d'impédance, ici mesurée en temps, qui sert de base au calcul des plus courts chemins. Pour cela, une matrice est régulièrement mise à jour afin de connaître la distance réseau entre chaque ville.

$$\text{Impédance de } i = L_i / V_i$$

Où  $L_i$  est la longueur de l'arc  $i$  en mètres et  $V_i$  la vitesse maximale autorisée sur l'arc  $i$ .

Donner une impédance aux arcs du réseau permet de « nuancer » la topologie. En effet, « les propriétés d'accessibilité et de centralité d'un sommet sont dictées par l'organisation des plus courts chemins sur le réseau et donc par la situation relative d'un sommet à l'intérieur de ce réseau » (Gleyze, 2007). La forme du réseau y est donc pour beaucoup, mais les plus courts chemins vont également être en partie fonction de l'impédance propre à chaque arc du réseau.

À titre heuristique, les graphes ont été valués comme suit : (i) les arcs sont séparés en 4 quarts qui ont une vitesse respective de 50 km/h, 90 km/h, 110 km/h et 130 km/h ; (ii) le choix des vitesses pour chaque arc est tiré aléatoirement au début de la simulation, mais reste le même pour toutes les simulations (hormis celles traitant de la *path dependency*). Il aurait été plus pertinent de distribuer les vitesses selon une logique spatiale afin d'introduire moins de hasard dans les résultats. Les réseaux modélisés étant théoriques et non-spatiaux à l'origine, nous avons décidé de garder une répartition aléatoire de l'impédance.

Simuler des réseaux urbains, en utilisant différents idéaux types de réseaux (valués ou pas) pour des semis de villes homogènes ou pas, permet d'explorer l'influence de la structure morphofonctionnelle des réseaux sur les distributions des tailles des villes obtenues à configuration initiale de villes donnée.

Les tableaux ci-dessous offrent un résumé des caractéristiques des réseaux étudiés.

Réseau	Aléatoire				Manhattan		Manhattan tronqué	
Indicateurs	Distribution homogène des villes		Distribution hétérogène des villes		Distribution homogène des villes		Distribution homogène des villes	
	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique
Diamètre	7	6	8	6	4	40	4	40
Nombre cyclomatique	1 068	1 068	1 068	1 068	400	400	316	316
Beta	3	3	3	3	1	1	1	1
Degré connectivité	64	64	64	64	115	115	128	128
Diamètre km	7	6	8	6	4	40	4	40
Eta	1	0	1	0	0	0	0	1
Pi	322	0	278	0	28	0	25	18
Indice de Shimbel topologique	667 096	654 840	682 605	654 812	308 991	2 716 560	324 173	2 760 292
Moyenne sp	3	3	3	3	2	14	1	14

*Tableau 7: Caractéristique des réseaux Aléatoire, Manhattan et Manhattan tronqué*

Réseau	Small world				Invariant d'échelle			
Indicateurs	Distribution homogène des villes		Distribution hétérogène des villes		Distribution homogène des villes		Distribution hétérogène des villes	
	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique	Valué	Topo- logique
Diamètre	7	15	19	15	22	17	30	17
Nombre cyclomatique	442	442	442	442	0	0	0	0
Beta	2	2	2	2	1	1	1	1
Degré connectivité	110	110	110	110	220	220	220	220
Diamètre km	7	15	19	15	22	17	30	17
Eta	1	0	1	0	1	0	1	0
Pi	64	0	68	0	31	0	23	0
Indice de Shimbel topologique	674 588	1 437 118	1 811 580	1 437 118	1 450 155	1 230 612	2 048 129	1 230 612
Moyenne sp	3	7	9	7	7	6	10	6

Tableau 8: Caractéristique des réseaux Small world et Invariant d'échelle

Le tableau ci-dessous représente une synthèse du plan d'expérience réalisé pour chaque type de réseau, à l'exception des réseaux de Manhattan et de Manhattan tronqué pour lesquels les configurations hétérogènes des villes n'ont pas été simulées, car il est impossible pour une distribution de villes hétérogène de bâtir des réseaux préservant la logique du réseau de Manhattan (les arcs auraient des longueurs différentes).

Le plan d'expérience a pour vocation d'explorer les effets de certains paramètres de l'interaction sur la dynamique d'émergence des hiérarchies et sur leur structure finale. La valeur de croissance naturelle retenue est de 1%. Elle est théorique et n'a pour seul intérêt que de faire croître la population totale du système, afin d'étudier sa concentration dans les villes tout en évitant la disparition de certaines villes à cause des migrations.

Enfin, pour les taux de migrations, nous modélisons là aussi des valeurs théoriques [1 et 2%] qui toutefois restent dans un ordre de grandeur crédible (cf. 2.1.5). Le taux de migration a pour intérêt de tester l'effet de l'intensité des flux migratoires sur la dynamique de hiérarchisation et de concentration de la population.

Les simulations présentées ont été réalisées selon une démarche exploratoire afin d'étudier le rôle des paramètres de l'interaction sur la structure et l'organisation hiérarchique des systèmes de villes.

Population initiale	Taux de migration	Distribution des villes	Distance
50	1	Homogène	Topologique
50	2	Homogène	Topologique
100	1	Homogène	Topologique
100	2	Homogène	Topologique
50	1	Hétérogène	Topologique
50	2	Hétérogène	Topologique
100	1	Hétérogène	Topologique
100	2	Hétérogène	Topologique
50	1	Homogène	Temps
50	2	Homogène	Temps
100	1	Homogène	Temps
100	2	Homogène	Temps
50	1	Hétérogène	Temps
50	2	Hétérogène	Temps
100	1	Hétérogène	Temps
100	2	Hétérogène	Temps

Tableau 9: Plan d'expérience par topologie de réseau (modèle d'interaction spatiale)

Le modèle d'interaction spatiale vise donc à explorer les liens entre les caractéristiques du réseau et la distribution plus ou moins hiérarchique du système de villes. Cette distribution est obtenue par simulation en faisant « déménager » des individus de leur ville d'origine à leur ville de destination, choisie en fonction de sa proximité et de sa contribution préalable aux échanges.

Les simulations ont été arrêtées après le pas de simulation (*ticks*) 300. Après celui-ci, on constate que la logique de structure hiérarchique n'évolue plus : les mêmes villes restent au sommet de la hiérarchie. On atteint donc un état proche de l'état stationnaire.

Il n'y a pas de répétition des simulations car le modèle simule l'interaction selon une logique gravitaire influencée par le réseau de transport. Nous avons répété quelques simulations et observé peu de changement dans les résultats. Les résultats dépendent des caractéristiques du réseau de transport. Réitérer les simulations ne change pas fondamentalement les résultats et notamment les distributions hiérarchiques finales.

### 2.2.5 Toujours pas de rang-taille

Toutes les simulations réalisées ont permis de constater une hiérarchisation du système de villes. Cependant, les formes des distributions diffèrent de celles obtenues avec les modèles d'interactions a-spatiales. La forme des distributions hiérarchiques varie en effet en fonction de la topologie de réseau modélisé sans correspondre pour autant à nouveau au modèle théorique rang-taille.

Nous avons analysé les distributions hiérarchiques résultant des simulations à l'aide de différents indicateurs :

- La somme des écarts en valeur absolue à la distribution théorique de Zipf. Cet indicateur permet d'évaluer la différence entre la population simulée et la population théorique

correspondant à une loi rang-taille. Une somme des écarts élevée traduit donc une distribution qui s'écarte de la loi rang-taille.

- Le ratio entre la taille de la première et dernière ville de la hiérarchie. Celui-ci permet d'estimer l'étendue de la distribution statistique de la taille des villes. Un ratio important montre une forte inégalité de population et potentiellement une hiérarchie très marquée.
- Le même indicateur est calculé, par rapport à la taille moyenne des 10% de villes les plus peuplées et les 10% les moins peuplées. Cet indicateur permet de nuancer le poids de la plus grande ville en comparant les villes formant le sommet de la hiérarchie avec celles de la queue de la distribution.

Au regard des distributions hiérarchiques obtenues, on constate que la topologie de réseau modélisé conditionne et influence la hiérarchie finale. Le réseau de Manhattan donne par exemple sans surprise des hiérarchies moins marquées que celle du réseau Invariant d'échelle.

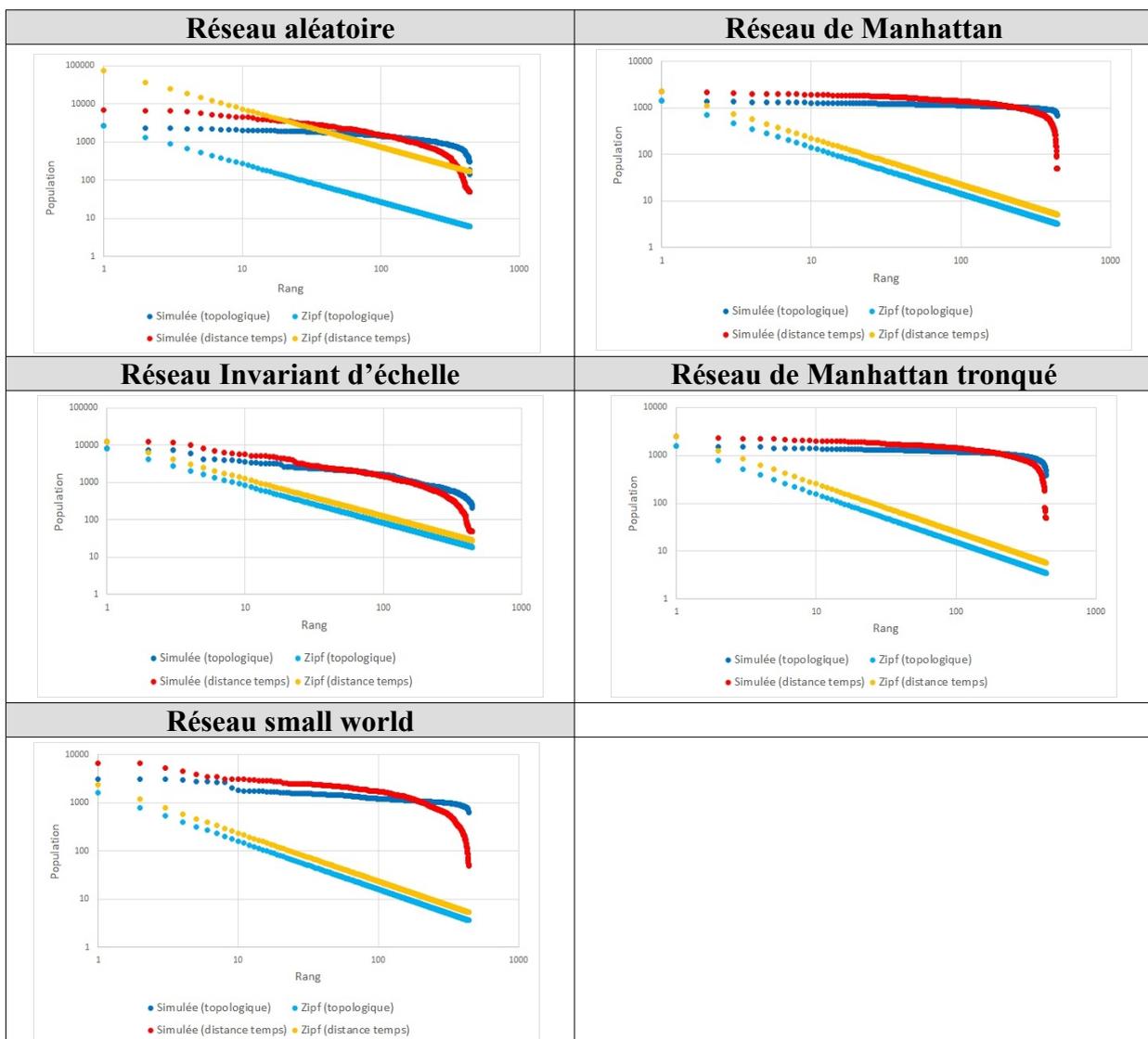


Figure 21: Distribution hiérarchique selon le type de réseau

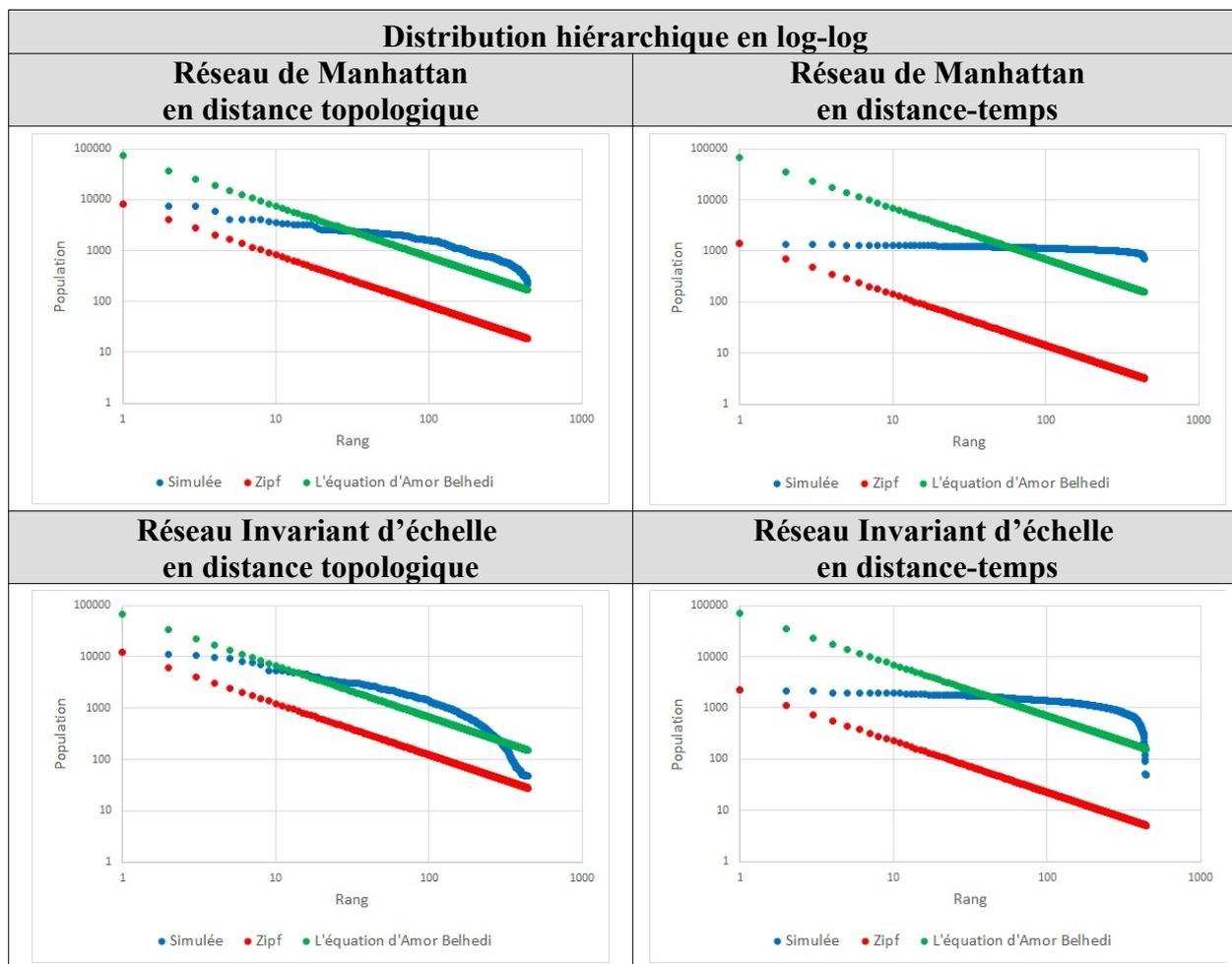


Figure 22: Comparaisons des résultats : réseau de Manhattan / réseau Invariant d'échelle

**Les résultats, pour les différents types de réseaux et les différentes distances (topologiques vs distance-temps), montrent que pour toutes les configurations émergent des hiérarchies.**

Si on les caractérise seulement à travers le ratio entre la taille moyenne du premier et la taille moyenne du dernier décile, on observe que le réseau Invariant d'échelle est celui qui génère les plus fortes valeurs. Le maximum est de 72 pour des simulations avec des distances topologiques, une population initiale de 50 par ville et un taux de migration de 2%. Le maximum de ce même ratio est de 1 140 pour des simulations avec des distance-temps, une population initiale de 100 par ville et un taux de migration de 2%.

Il est suivi du réseau Aléatoire, du réseau Small world, du réseau Manhattan tronqué et du réseau Manhattan. Cet ordre est respecté que l'on considère les distances topologiques ou les distance-temps, la nuance étant que les différences de taille entre les plus grandes et les plus petites villes sont plus fortes pour les distances temps (le ratio interdéciles est plus de vingt fois supérieur et dépassent ceux obtenus par la distribution théorique de Zipf), ce qui est logique puisque l'hétérogénéité des vitesses se rajoute à celle de la topologie du réseau.

Les résultats pour les réseaux Manhattan et Manhattan tronqués étant très similaires, nous intégrons uniquement les résultats du premier dans le tableau de comparaison.

Réseau	Population initiale	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue		Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)		Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé)	
			Topologique	Temps	Topologique	Temps	Topologique	Temps
Distance			Topologique	Temps	Topologique	Temps	Topologique	Temps
Aléatoire	50	1	453	416	18	142	8	112
Aléatoire	50	2	447	395	17	363	9	293
Aléatoire	100	1	824	798	13	150	7	74
Aléatoire	100	2	832	791	18	537	8	212
Invariant d'échelle	50	1	415	366	38	254	20	174
Invariant d'échelle	50	2	402	342	72	582	31	371
Invariant d'échelle	100	1	766	707	34	251	17	117
Invariant d'échelle	100	2	769	696	48	1140	26	672
Small world	50	1	449	447	4	137	3	61
Small world	50	2	453	432	2	207	2	85
Small world	100	1	839	827	5	98	3	39
Small world	100	2	841	823	2	135	2	60
Manhattan	50	1	452	453	2	46	1	20
Manhattan	50	2	454	440	2	96	1	21
Manhattan	100	1	836	834	2	39	1	14
Manhattan	100	2	836	832	2	175	1	21

Tableau 10: Hiérarchies des villes pour différents réseaux (modèle spatial)

Si on compare ces résultats avec ceux obtenus par pour les logiques d'interaction « a-spatiale » (modèle aléatoire et contribution, cf. 2.1.7), on constate qu'avec les réseaux, les distributions se rapprochent davantage des distributions théoriques. En effet, le modèle d'interaction a-spatiale « aléatoire » a des écarts minimums avoisinant 1 milliard et maximums avoisinant les 10 000 milliards pour des populations initiales à 250. Le modèle d'interaction a-spatiale « contribution » a des écarts minimums avoisinant les 3 milliards et maximums avoisinant les 14 000 milliards pour des populations initiales à 250.

Le modèle d'interaction spatiale affiche quant à lui des écarts moindres compris entre 402 milliers et 839 milliers pour les simulations reposant sur des distances topologiques et des écarts compris entre 342 milliers et 834 milliers pour les simulations reposant sur des distances-temps.

Ces résultats sont à relativiser étant donné le nombre inférieur de villes simulées par rapport aux modèles d'interaction « a-spatiale ». Pour cela, la somme des écarts est rapportée au nombre de villes simulées (441). Leur écart maximal est de 1.9 tandis que le minimum est de 0.7. Pour le modèle d'interaction « a-spatiale », si on rapporte la somme des écarts au nombre de villes, on trouve un maximum de 21 millions pour le modèle aléatoire et 27 millions pour le modèle contribution pour des minimums de 1 700 et 2 118. La somme des écarts à la loi rang-taille diminue bien dès lors que l'espace est modélisé.

Si aucun des réseaux modélisés ne permet de tendre actuellement vers une distribution rang-taille théorique, on observe cependant des inégalités de population à partir de populations initiales

identiques. Le réseau favorise la croissance de certaines villes. Il nous faut alors comprendre comment le réseau influence cette structure.

Synthétiquement, aucune simulation ne permet strictement d'approcher les distributions statistiques théoriques de type rang-taille. Les deux réseaux qui produisent les résultats les plus opposés sont le réseau de Manhattan et le réseau Invariant d'échelle. Comme on pouvait s'y attendre, Manhattan produit les distributions les moins hiérarchisées. Seules les queues de distribution du côté des petites villes diffèrent fortement. Cela s'explique par le fait que l'accessibilité, aussi bien topologique qu'en distance-temps, est distribuée de façon très homogène sur ce type de réseau, à l'exception des lieux situés en bordure de réseau. Les distance-temps ne font que renforcer cet « effet de bord ». À l'inverse, le réseau Invariant d'échelle est celui pour lequel les distributions sont les plus hiérarchisées et se rapprochent le plus du modèle de la loi rang-taille. Cette forte hiérarchie s'explique par la distribution très inégale de l'accessibilité dans ce type de réseau (les *hubs* sont très favorisés par la topologie).

Aussi, outre la mise en regard des réseaux de villes obtenus avec le modèle de la loi rang-taille, nous avons également cherché à expliquer la taille des villes, c'est-à-dire tenté de comprendre pourquoi elles se retrouvaient en haut ou en bas de la hiérarchie.

## 2.2.6 La centralité et l'accessibilité expliquent-elles la population des villes et leur rang ?

Au vu de l'influence manifeste de la topologie de réseau sur la forme des distributions hiérarchiques, un travail de compréhension de la position hiérarchique de chaque ville a été mené. Deux variables potentiellement explicatives de la taille finale des villes, la centralité et l'accessibilité, ont été testées. Il s'agit de savoir si les villes qui bénéficient d'une bonne centralité et d'une bonne accessibilité, eu égard à la configuration morphofonctionnelle des réseaux, sont celles qui arrivent en haut de la hiérarchie en fin de simulation. L'hypothèse est que leur position stratégique dans l'espace réseau va favoriser leurs interactions.

Pour tester dans quelle mesure centralité et accessibilité expliquent la position finale des villes dans la hiérarchie pour chaque type de réseau étudié, nous avons mesuré les corrélations entre la population simulée des villes, leur rang, leur contribution aux échanges et différents indicateurs exprimant la centralité et l'accessibilité.

### 2.2.6.1 Définition des mesures

Différents indicateurs issus de la théorie des graphes permettent d'étudier la centralité et l'accessibilité d'un sommet dans un graphe. Les indicateurs choisis se distinguent selon la classification faite par le groupe fmr (Drevelle, 2013a), selon qu'ils soient topologiques ou géographiques. Les indices évoqués sont calculés à partir de  $R$  et du package « *igraph* »<sup>14</sup>.

- **Les indices topologiques** se basent sur le nombre de sommets, d'arcs et de cycles. C'est donc la forme du réseau, le nombre de connexions qui influencent les indices.

- **Les indices géographiques** vont prendre en compte « le poids » des sommets et des arcs. On va alors pouvoir faire entrer en ligne de compte la distance, ou calculer des indices en fonction de ce que coûtent, en argent, en temps ou même en énergie, d'emprunter tels ou tels arcs.

Trois indicateurs ont été retenus (*eigenvector centrality*, *betweenness* et *closeness*). Ce sont des mesures locales, car elles caractérisent la position de chaque sommet dans le graphe plutôt que

---

<sup>14</sup> <https://igraph.org/r/doc/>

de chercher à caractériser le graphe dans son ensemble. Parmi les mesures « locales » on distingue :

1- **Les mesures locales de voisinages.** Elles décrivent la situation d'un sommet par rapport à ses voisins. Dans cette catégorie nous utiliserons l'indice *Eigenvector centrality* (centralité de vecteur propre ou centralité spectrale) qui permet de mesurer l'influence d'un sommet ou d'un arc dans un réseau. Chaque sommet va se voir attribuer un score qui correspond à sa centralité dans le réseau ainsi, « La centralité de vecteur propre (*eigen-vector centrality*) mesure de quelle manière un nœud est connecté aux autres nœuds fortement connectés du graphe. Cet indice est basé sur le principe qu'un lien avec un nœud peu connecté « vaut » moins qu'un lien avec un nœud très connecté. C'est en quelque sorte une extension de la centralité de degré, dans laquelle le poids des nœuds voisins est dépendant de leur centralité » (Drevelle, 2013b).

2- **Les mesures locales d'ensemble :** Ces mesures vont illustrer la situation de chaque sommet par rapport à tous les autres au sein d'un graphe. C'est le cas des indices *betweenness* et *closeness* que nous avons utilisés (Ducruet, 2010).

- ***Betweenness*** (centralité intermédiaire) : « les sommets ayant un niveau élevé de centralité intermédiaire sont ceux qui permettent de limiter la distance à parcourir dans le réseau. Leur suppression conduirait donc à ralentir le flux puisque ce dernier devrait passer par des chemins plus longs » (Ducruet, 2010). Cet indice se calcule en comptant le nombre de fois que le sommet, ici la ville, est sur un plus court chemin entre tous les couples de villes. Cela permet alors de mettre en évidence les sommets stratégiques pour la circulation. Les sommets ayant un indice de centralité intermédiaire élevé sont « centraux » du fait qu'ils sont des points de passage privilégiés. Si on les supprime, la circulation dans le réseau se dégrade en termes d'efficacité, de rapidité et d'économie. Les sommets à forte intermédiation sont donc des points de passages préférentiels pour relier efficacement deux sommets d'un graphe.
- ***Closeness centrality*** (centralité de proximité) : valeur normalisée de 0 à 1 qui permet de montrer les sommets ayant la plus forte accessibilité. La valeur 1 correspond alors à une accessibilité maximale. En effet, cet indice est le résultat du calcul de l'inverse de la distance moyenne cumulée pour atteindre ce sommet depuis tous les autres. Les sommets se rapprochant de 1 ont alors une distance (temps, coût, énergétique, etc.) plus faible par rapport à tous les autres sommets du système.

Pour étudier dans quelle mesure la centralité et l'accessibilité expliquent la place des villes dans les distributions obtenues après simulation, nous avons cherché à les corrélés à :

- La population finale des villes,
- Leur rang hiérarchique,
- Le nombre d'interactions qu'elles ont eu en cours de simulation,
- La réception : le nombre de fois qu'une ville reçoit un agent migrant,
- Le classement : le rang des villes en fonction du nombre d'interactions totales depuis le début de la simulation.

### ***2.2.6.2 Corrélation entre centralité, accessibilité et rang hiérarchique : aucun indicateur n'explique seul la position des villes***

Il convient tout d'abord de souligner les fortes corrélations pour l'ensemble des simulations (distance topologique et distance-temps) concernant le lien entre la population et le nombre d'échanges (compris entre 0.86 et 0.99), puis entre le rang et le classement (compris entre 0.87 et 0.99) avec des valeurs statistiquement significatives. Ces résultats sont logiques au vu de l'algorithme du modèle qui favorise les villes qui contribuent le plus aux interactions.

Toutefois, il ne semble pas exister un indicateur permettant d'anticiper, pour tous les types de réseaux, les villes qui vont être au sommet de la hiérarchie ou pas. La multiplicité des caractéristiques de chaque réseau fait qu'on ne peut utiliser un seul indicateur pour expliquer l'organisation hiérarchique du système de villes. Le caractère systémique de la croissance urbaine au sein du système de villes rend la compréhension des phénomènes complexes. Il semble néanmoins que la position des villes au sein du réseau ait une conséquence sur leur place dans la hiérarchie urbaine, notamment par rapport à la centralité et à l'accessibilité relative de chaque ville qui impactent leur potentiel d'interaction. Les propriétés de chaque réseau vont donner plus d'importance à l'un ou à l'autre paramètre. Si la centralité est une condition forte pour capter la croissance, jouer sur des impédances différentes va accentuer ou dégrader l'importance de celle-ci. Ce que mettent en évidence les différences de corrélation entre les simulations en distance topologique et en distance-temps.

Le réseau Invariant d'échelle par sa structure favorise les villes intermédiaires pour capter la croissance exogène, tandis que pour les réseaux plus homogènes, tel que le réseau de Manhattan, il semble que ce soit davantage l'impédance des arcs, lors des simulations basées sur des distances-temps, qui va influencer la croissance. Par exemple, pour les simulations en distance topologique avec le réseau de Manhattan qui permet une centralité et une accessibilité relativement identiques entre les villes, il n'y a pas de relations statistiques significatives entre les indicateurs utilisés et les populations finales. Le réseau Aléatoire dense ne permet pas non plus de mettre en évidence l'influence des trois indicateurs.

Pour le réseau Small world, on observe une bonne corrélation entre la betweenness (centralité d'intermédiarité), la participation aux échanges, et la population finale. Les corrélations pour ces indicateurs varient entre 0.42 et 0.54 pour les simulations se déroulant sur une répartition homogène des villes en distance topologique. Les valeurs diminuent pour les distances-temps avec des corrélations comprises entre 0.29 et 0.34 puisque la friction de l'espace, représentée par les différences de vitesse, modifie les plus courts chemins. Ce type de réseau permet d'avoir peu d'intermédiaires entre chaque ville. Cependant, il semble que certaines villes se retrouvent elles aussi en position de nœud intermédiaire privilégié, car elles seraient sur de nombreux plus courts chemins. Elles sont alors des points de passage privilégiés pour l'échange et la migration. Leur position dans le graphe leur permet de capter plus facilement les flux.

***C'est donc la capacité à capter les flux qui expliquerait des différences de croissance : plus on est intermédiaire et accessible plus on a la possibilité de capter les flux et ainsi croître au détriment des villes peu accessibles.***

Aucun des indicateurs n'explique réellement la position de chaque ville, c'est un tout. La structure joue sur les différences de croissance, puisqu'elle impacte le potentiel d'interaction de chaque ville en faisant considérablement varier la centralité et l'accessibilité des villes. Les différences de vitesse modifient aussi le potentiel d'interaction des villes. Une ville connectée à de nombreux arcs routiers, à l'autoroute et ayant accès au chemin de fer a un potentiel d'interaction supérieur à un village accessible par une seule route de campagne sinueuse. La

structure topologique et les fonctionnalités du réseau jouent donc sur la croissance des villes. Cependant, la centralité compte plus que l'accessibilité. Dans l'espace géographique, il est plus essentiel d'avoir une bonne connexion et position dans le réseau plutôt que de bénéficier des meilleures vitesses.

Les résultats montrent que les indicateurs de centralité (*betweenness* et *eigenvector centrality*) peinent à expliquer les populations et les rangs des villes. Les meilleures corrélations sont obtenues pour le réseau Invariant d'échelle en considérant les distances topologiques. Ceci est valable pour tous les réseaux considérés.

Seuls les résultats les plus significatifs ont été intégrés aux tableaux ci-dessous. Pour consulter en détail les corrélations (cf. Annexe A et B). La taille de la population initiale, son homogénéité ou non et le taux de migration influencent peu les corrélations. Ce sont la topologie et les distances simulées qui expliquent le plus les rangs hiérarchiques.

Distribution spatiale des villes	Homogène				Hétérogène			
	50		100		50		100	
Taux de migration	1	2	1	2	1	2	1	2
Réseau	Invariant d'échelle							
Échange ~ betweenness	0.64	0.63	0.64	0.63	0.61	0.62	0.62	0.63
Échange ~ eigen centrality	0.61	0.60	0.61	0.6	0.59	0.59	0.6	0.6
Recoit ~ betweenness	0.65	0.63	0.64	0.63	0.65	0.63	0.65	0.64
Recoit ~ eigen centrality	0.61	0.60	0.61	0.60	0.62	0.6	0.62	0.6
Population ~ betweenness2	0.64	0.63	0.63	0.61	0.63	0.61	0.64	0.61
Population ~ eigen centrality	0.61	0.6	0.6	0.58	0.6	0.59	0.61	0.59
	Small world							
Échange ~ betweenness	0.51	0.52	0.47	0.54	-	-	-	-
Échange ~ eigen centrality	0.33	0.39	0.4	0.46	-	-	-	-
Recoit ~ betweenness	0.51	0.52	0.49	0.54	0.35	0.46	0.38	0.44
Recoit ~ eigen centrality	0.35	0.4	0.42	0.47	-	-	-	-
Population ~ betweenness	0.47	0.51	0.42	0.51	0.19	0.42	0.22	0.37
Population ~ eigen centrality	0.32	0.41	0.4	0.4	-	-	-	-
Rang ~ betweenness	-0.41	-0.45	-0.36	-0.43	-	-	-	-
Rang ~ eigen centrality	-0.25	-0.31	-0.33	-0.39	-	-	-	-

Tableau 11: Synthèse des principales corrélations significatives (distance topologique). (Les cases vides correspondent à des valeurs non significatives)

Distribution spatiale des villes	Homogène				Hétérogène			
	50		100		50		100	
Taux de migration	1	2	1	2	1	2	1	2
Réseau	Invariant d'échelle							
Échange ~ betweenness	0.59	0.59	0.59	0.59	0.53	0.53	0.53	0.53
Recoit ~ betweenness	0.6	0.59	0.59	0.59	0.54	0.53	0.55	0.53
Population ~ betweenness	0.59	0.58	0.57	0.59	0.52	0.53	0.54	0.52
Population ~ eigen centrality	0.45	0.45	0.45	0.44	-	-	-	-
	Small world							
Échange ~ betweenness	-	-	-	-	0.29	0.34	0.29	0.3
Recoit~betweenness	-	-	-	-	0.36	0.38	0.35	0.36
Population~betweenness	-	-	-	-	0.31	0.35	0.29	0.32
Rang~betweenness	-	-	-	-	-0.39	-0.4	-0.37	-0.4
Rang~closeness	-	-	-	-	-0.26	-0.3	-0.25	-0.26
	Aléatoire							
Rang~closeness	-0.37	-0.39	-0.37	-0.39	-	-	-	-

Tableau 12: Synthèse des principales corrélations significatives (distance-temps). (Les cases vides correspondent à des valeurs non significatives)

Comme évoqué, il n'y a pas d'indicateurs simples qui permettent d'expliquer le rang hiérarchique des villes, mais seulement une combinaison de paramètres déterminés par les propriétés du réseau.

Pour tous les réseaux, c'est la *betweenness*, avec des différences importantes de coefficient de corrélation, qui explique le mieux la population finale des villes. Pour les distances topologiques, il est par exemple de 0.13 pour le réseau de Manhattan, de 0.3 pour le réseau aléatoire, 0.4 pour le réseau Small World et de 0.6 pour le réseau Invariant d'échelle. Cet ordre des réseaux est globalement respecté, quel que soit l'indicateur de centralité et le type de distance considéré.

*Clossenness* et *eigenvector centrality* sont moins corrélés à la population finale avec des variations selon le réseau considéré. Globalement la *clossenness* est meilleure que l'*eigen-centrality* pour expliquer les populations finales. Si les mesures de centralité peinent à expliquer les populations finales, c'est encore plus le cas pour le rang des villes.

Notons que la *clossenness* est logiquement plus corrélée avec les indicateurs lorsqu'on simule sur des distance-temps. L'impédance des arcs joue alors sur les agents et impacte l'interaction entre les villes ce qui donne une plus grande importance à l'accessibilité. Si l'impédance d'un arc est beaucoup plus petite que les autres on choisira cet arc pour le trajet en plus court chemin.

Précisons toutefois que si les corrélations statistiques entre indices de centralité et population des villes sont relativement faibles, cela ne signifie pas pour autant qu'il n'y ait aucun lien. En effet, si on étudie la localisation des plus grosses villes en fin de simulation, on observe bien qu'elles sont assez systématiquement situées aux nœuds stratégiques du réseau (à forte intermédiation), comme on peut le voir sur la Figure ci-dessous.

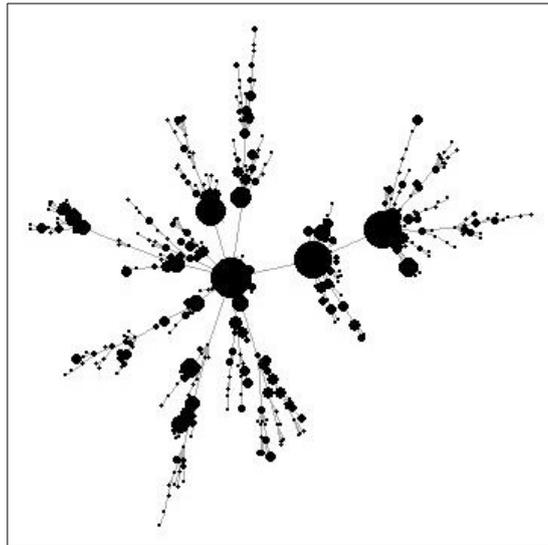


Figure 23: Taille finale des villes (réseau Invariant d'échelle)

En partant d'un ensemble de villes de même taille, les simulations réalisées pour différents idéaux types de réseaux, que ce soit en considérant des distances topologiques ou des distance-temps, montrent que la configuration des réseaux (en premier lieu leur topologie) influence la distribution statistique de la taille des villes obtenues. **Plus l'intermédiarité et la centralité sont distribuées de façon homogène, moins les différences de tailles de villes seront fortes.** À cet égard on peut opposer les réseaux de type Manhattan aux réseaux Invariant d'échelle. Il apparaît par ailleurs que le modèle de simulation utilisé ne parvient pas à reproduire strictement une distribution statistique de villes proche de la loi rang-taille, même si c'est le réseau Invariant d'échelle qui permet de s'en rapprocher le plus. Ce n'est pas surprenant sachant que ce réseau est celui qui se rapproche le plus des réseaux routiers réels dans sa structure, qui permettent depuis les plus petites villes de rejoindre les pôles les plus importants, eux-mêmes bien connectés par des autoroutes par exemple. Enfin, si la centralité n'est pas une condition suffisante pour expliquer statistiquement la taille des villes en fin de simulation, elle reste néanmoins un facteur explicatif important. Elle l'est au moins pour les réseaux dans lesquels elle est distribuée de façon inégale. Les villes les plus peuplées figurent en effet souvent parmi celles qui ont les indices de centralité les plus élevés.

Cette incapacité à établir un lien statistique simple entre accessibilité-centralité et taille des villes rejoint les résultats de travaux empiriques. En effet, si certaines études parviennent à établir de telles corrélations Bretagnolle relève par exemple une corrélation croissante dans le temps entre la hiérarchie urbaine et la hiérarchie de l'accessibilité temporelle (Bretagnolle, 2003). Pour le réseau ferroviaire français ; Berger et Enflo (Berger, Enflo, 2017) montrent l'effet causal immédiat de la croissance de l'accessibilité ferroviaire en Suède de 1800 à 2010 sur la croissance de la population des villes, suivi sur le temps long d'une forte inertie de la hiérarchie des populations. D'autres en revanche, à l'image de Mineur (Mimeur et al, 2017), montrent la non-significativité statistique de la corrélation entre taux de croissance et évolution de la couverture du réseau.

Comme nous l'avons vu, tout semble dépendre de la logique relationnelle du réseau (ce qui illustre l'intérêt d'avoir mobilisé des réseaux stylisés) et de la temporalité envisagée pour étudier

les corrélations entre position dans le réseau et accessibilité puis, entre croissance et taille de ville.

À nouveau, aucune des topologies de réseau modélisé n'a permis d'obtenir une distribution hiérarchique de type rang-taille. La cause peut-elle être due à l'utilisation de réseaux théoriques types « trop différents » de la réalité territoriale ? Afin de creuser cette question une simulation a été réalisée à partir d'un réseau théorique construit sur une logique d'efficacité.

### **2.2.7 Simuler l'interaction sur un réseau créé selon une logique d'efficacité territoriale : le réseau « Proximité-Contribution » ou « P-C »**

Si la structure du réseau de transport a bien une incidence sur la structure de la hiérarchie urbaine, les simulations réalisées avec les réseaux théoriques n'ont malheureusement pas permis d'obtenir des distributions rang-taille. Pour autant, nous ne pouvons pas encore conclure à ce stade pas qu'il est impossible d'y parvenir car les réseaux utilisés correspondaient à des idéaux types qui ne se retrouvent pas sous leur forme pure dans la réalité empirique. En utilisant un nouveau réseau créé de toutes pièces selon une logique « d'efficacité » reflétant « mieux à la réalité » nous cherchons à voir s'il est possible d'atteindre une distribution hiérarchique rang-taille ?

Ce réseau est le résultat des interactions entre les villes. Il connecte les villes proches et celles qui ont des relations d'interactions. Sa construction suit la logique suivante :

- On distribue des villes, avec une population initiale à 50, aléatoirement dans l'espace, puis on les fait échanger. Le choix du partenaire se fait comme précédemment en fonction de la contribution des villes aux échanges, mais les réseaux ne rentrent pas en compte, car ils ne sont à ce stade pas encore modélisés.

$$\text{Choix du partenaire} = Fi / Dij$$

Où  $F_i$  la contribution aux échanges  $F_i = ni / N$ , avec  $N$  le nombre d'échanges ayant eu lieu depuis le début de la simulation,  $ni$  le nombre d'échanges (émis et reçus) concernant la ville  $i$  et  $D_{ij}$  distance euclidienne entre  $i$  et  $j$ .

- Puis, dans une deuxième étape, chaque ville crée un arc avec la ville avec qui elle a le plus échangé sur 7 *ticks*. On met ensuite le partenaire (la ville vers qui on a créé un arc) dans une liste de villes avec lesquelles il ne faut plus créer d'arcs.
- On réitère encore trois fois cette opération afin de créer un réseau connexe.

Avec cette procédure, nous simulons sur un réseau construit en fonction des interactions qui relève globalement d'une logique d'efficacité (on tisse des liens avec les villes avec qui les relations sont les plus fortes) et non un réseau construit de manière arbitraire comme peuvent l'être les réseaux théoriques types.

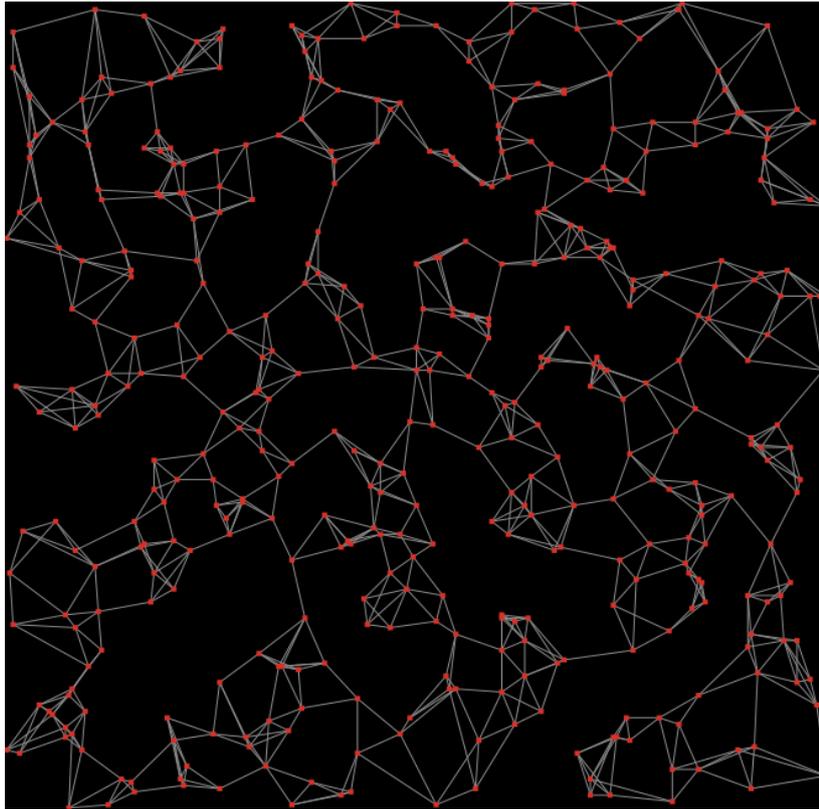


Figure 24 Configuration initiale du réseau « P-C »

Sur cette base, on fait échanger les villes avec le même algorithme que pour les simulations précédentes. Ce modèle utilise des distances topologiques.

Les résultats montrent qu'on obtient une hiérarchie, mais peu marquée et qui s'éloigne d'une rang-taille (cf. Figure 25). Simuler l'interaction entre les villes sur un réseau répondant à une logique d'efficacité permet d'obtenir une hiérarchie urbaine plus équilibrée.

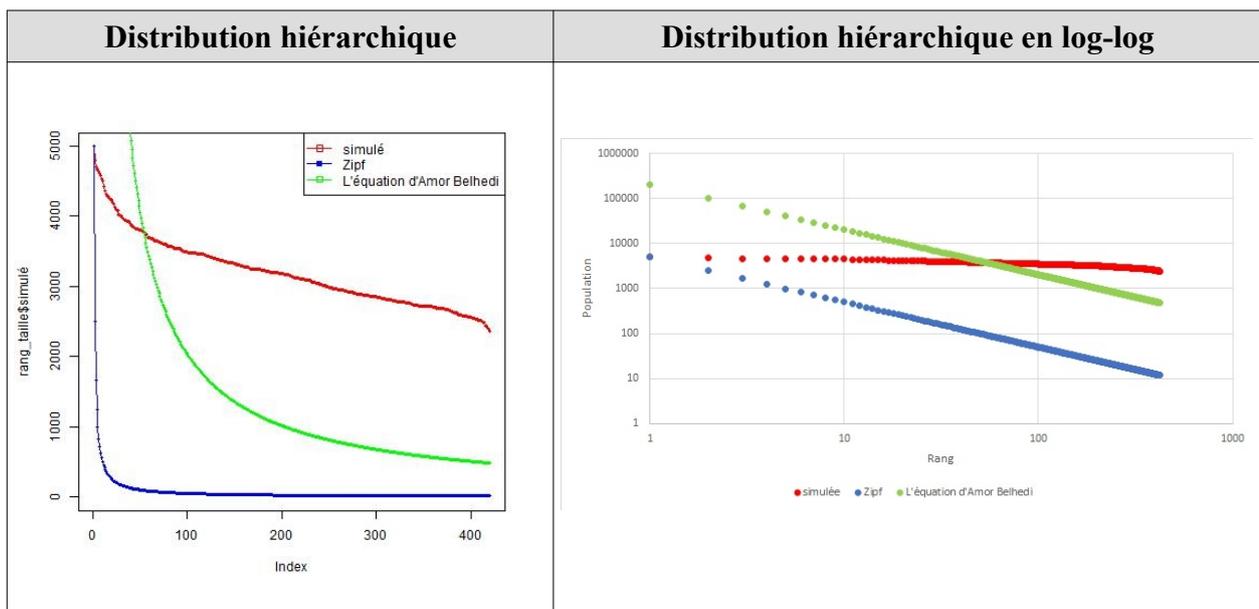


Figure 25: Comparaison aux distributions théoriques (réseau « P-C »). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi

La distribution hiérarchique obtenue avec ce réseau s'écarte assez profondément de celles des réseaux théoriques. Elle se rapproche cependant de celles obtenues pour les réseaux théoriques Small world et de Manhattan. La somme des écarts est de 1 308 pour un maximum de 841 obtenu avec le réseau de Small world. Ses ratios sont similaires à ceux obtenus avec le réseau Small world (2 pour le ratio entre la première et la dernière ville puis, 2 pour le ratio entre la moyenne du premier décile et la moyenne du dernier décile), et le réseau de Manhattan avec des distances topologiques (2 pour le ratio entre la taille de la première et de la dernière ville puis, 1 pour le ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile).

Somme des écarts à Zipf (en milliers)	Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)	Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé)
1 308	2.1	1.9

Tableau 13 Étude de l'écart aux modèles théoriques (réseau « P-C »).

Le réseau théorique construit, selon les interactions antérieures entre chaque ville, produit un réseau qui offre des potentiels d'interaction relativement homogène et égalitaire entre les villes. Chaque ville possède au moins trois connexions directes avec d'autres villes. Les villes qui vont avoir les meilleurs rangs hiérarchiques sont celles qui sont les plus intermédiaires et avec la meilleure transitivité. C'est pour cela que l'inégalité de peuplement n'est pas marquée entre le sommet et le bas de la hiérarchie. Cette topologie de réseau théorique ne permet donc pas de parvenir une fois de plus à une distribution statistique des villes selon le modèle théorique rang-taille.

Ainsi, aucune des simulations réalisées n'a permis d'obtenir une distribution rang-taille des villes sans pour autant que l'on puisse définitivement en conclure qu'il est impossible de parvenir à reproduire des distributions rang-taille uniquement en jouant sur les règles d'interactions et les propriétés des réseaux de transports. En effet, les quelques réseaux théoriques modélisés n'épuisent pas la diversité des configurations spatiales empiriques. Ils ont avant tout eu pour vocation de montrer l'influence de la métrique des réseaux de transport sur les structures hiérarchiques.

Après avoir montré cet effet du réseau de transport sur le système de villes et sa hiérarchisation, une autre étape de notre travail a consisté à chercher à évaluer de quelle manière il était possible d'impacter sur cette hiérarchisation à partir de modifications des réseaux.

On cherche ici à voir dans quelle mesure le réseau de transport peut réellement être un levier pour infléchir la trajectoire des systèmes de villes, ce qui revient à tester « l'effet structurant des réseaux » qui reste à discuter (Offner, 1993).

Dit autrement, le réseau « d'origine » conditionne-t-il totalement le système de villes obtenu ? Une modification topologique ou fonctionnelle d'un réseau peut-elle « renverser » les hiérarchies comme les aménageurs sont portés à le croire ? Une structure indurée devient-elle impossible à modifier ? La fusion de deux réseaux de villes brusquement interconnectées par des modifications du réseau de transport rebat-elle totalement les cartes dans la hiérarchie des villes ? Autant de questions intéressantes pour savoir, dans une optique d'aménagement du territoire, dans quelle mesure des changements dans les caractéristiques topologiques ou morphofonctionnelles des réseaux de transport peuvent effectivement modifier la hiérarchie des systèmes de villes.

Pour tenter d'y apporter une réponse, nous utiliserons désormais le modèle d'interaction spatiale pour explorer la résistance aux changements des systèmes de villes.

### 2.3 La hiérarchie urbaine est-elle soumise à la *path dependency* ?

Toujours dans l'optique d'explorer les relations entre réseaux de transport et hiérarchie urbaine, nous avons voulu savoir si un changement drastique de topologie et d'impédance des arcs du réseau au cours d'une simulation était en mesure de modifier les résultats obtenus quant à la taille des villes. Cela revient donc à étudier la *path dependency* (Sanders, 2014), c'est-à-dire à savoir si, une fois les choses engagées dans une direction, il était possible de les modifier ou si au contraire des effets d'inertie rendaient impossibles ces renversements de tendance.

Incidentement, il s'agit d'estimer le degré de liberté dont peuvent bénéficier les aménageurs. Par exemple, est-il raisonnable de penser que des changements dans la structure des réseaux de transport peuvent être suffisants pour infléchir durablement les trajectoires des villes ? Sommes-nous dans un cas de dépendance à la trajectoire (*path dependency*) ? Sanders précise comment la *path dependency* 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*) » (Sanders, 2014) citée dans l'HDR de Tannier (Tannier, 2017).

Dans cette perspective d'explorer la *path dependency* des systèmes de villes, nous avons effectué de nouvelles simulations en modifiant les configurations du système en cours de simulation. Ces simulations relèvent de deux catégories selon :

- qu'elles testent l'effet de changement global sur le réseau de transport en cours de simulation (nouvelle vitesse, nouvelle structure du réseau, fusion entre deux systèmes de villes). Leur but est de voir en quoi une action d'aménagement peut influencer la hiérarchie en cours de constitution en influençant les croissances urbaines,
- qu'elles testent de nouveaux paramètres à une échelle plus locale (améliorer les vitesses entre les plus petites villes par exemple).

Concrètement, les modifications vont consister à :

1. Améliorer les connexions des villes ayant le plus faible potentiel d'interaction et à détériorer celles des villes ayant initialement le meilleur potentiel d'interaction. On peut s'attendre à observer une remontée dans la hiérarchie des villes ayant bénéficié des modifications. Si rien ne se passe, c'est alors qu'une fois mise en place, la structure hiérarchique est stable. On illustrerait ici d'une autre manière le mythe des effets structurants des infrastructures de transport (Offner, 1993),
2. Augmenter les vitesses en cours de simulation. Ce changement de vitesse (qui correspondrait à une innovation technique comme le passage aux modes de transport mécanisés ou encore à l'introduction de la grande vitesse ferroviaire) aura pour conséquence d'augmenter la portée des interactions pertinentes pour les individus. On

pourra alors observer si ces changements de vitesse, qui facilitent les interactions à longue portée, vont diminuer le poids de la structure du réseau en homogénéisant les potentiels d'interaction ou si au contraire les niveaux de villes intermédiaires, initialement protégées par la friction de la distance, vont être shuntées, produisant alors une concentration de la population dans les plus grandes villes et un affaiblissement des niveaux intermédiaires,

3. Commencer la simulation avec une hiérarchie urbaine déjà établie, selon la loi rang-taille, puis créer une rocade connectant les plus petites villes entre elles par l'intermédiaire d'arcs ayant une vitesse élevée. L'objectif est à nouveau d'étudier la stabilité de la hiérarchie initiale face à la mise en œuvre de politique visant à améliorer l'accessibilité des plus petites villes,
4. Simuler deux systèmes de villes possédant un réseau de transport propre et qui évoluent séparément l'un de l'autre, puis qui vont être connectés par quelques arcs en milieu de la simulation. Le but est ici de voir comment deux systèmes de villes hiérarchisés s'organisent une fois mis en relation. Cette simulation correspond aux logiques « d'intégration territoriale » quelle qu'en soit l'échelle (régionale, nationale) où deux (ou plusieurs) systèmes pensés et fonctionnant de façon relativement autonome se voient brusquement connectés et vont fonctionner à une échelle plus vaste.

### 2.3.1 Conséquence d'une modification de la structure du réseau en cours de simulation

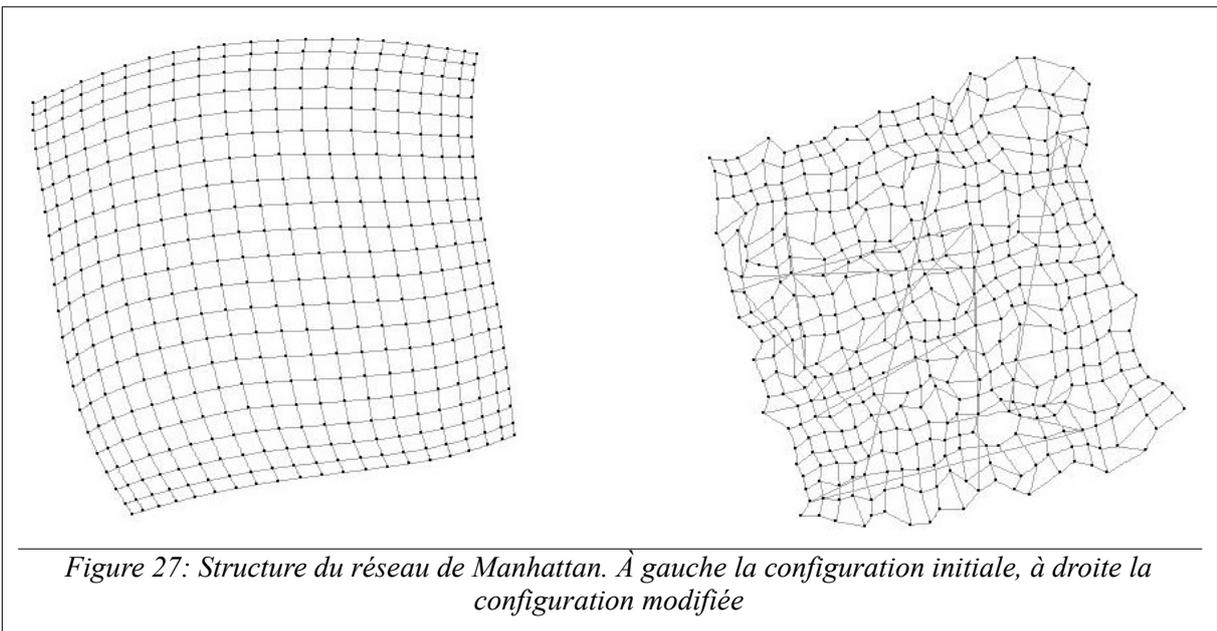
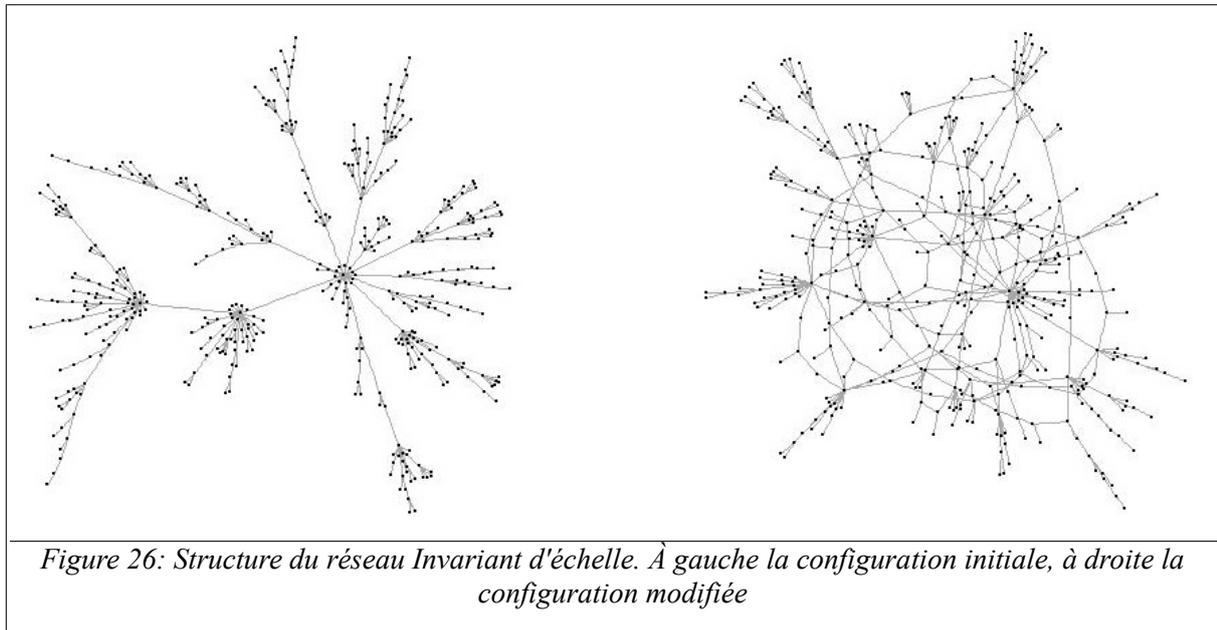
Nous gardons les mêmes paramètres et configurations de simulations que précédemment. Mais au milieu de la simulation (150 *ticks* sur 300), des modifications ont été réalisées. Ces modifications du réseau ont consisté à retirer des arcs aux villes les mieux connectées, donc à diminuer leur nodalité, pour les réaffecter aux villes les moins bien connectées. De façon très marginale, de nouveaux arcs ont également été ajoutés. Le choix des arcs à supprimer ou à créer n'a pas été fait par un algorithme spécifique. Après avoir classé les villes selon leur nombre de connexions directes, les villes ayant le plus de connexions en ont perdu et à l'inverse, les villes ayant peu de connexions en ont gagné. Cependant, quand nous choisissons une ville à laquelle on ajoute un arc, nous ne choisissons pas à quelle ville l'arc va la connecter (choix aléatoire).

Ces modifications portent sur environ 1.6% des arcs du réseau Aléatoire, 1.8% du réseau Small world, 2% du réseau de Manhattan et 3% du réseau Invariant d'échelle. Ces pourcentages ne sont pas les mêmes à cause du nombre initial d'arcs qui composent chaque réseau. Dans une optique d'aménagement du territoire, il est peu crédible de modifier très lourdement le réseau. C'est pourquoi nous ne voulions pas profondément changer la nature du réseau. Nous désirons voir si impacter seulement quelques arcs suffit à changer la structure émergente.

Réseau	Aléatoire	Manhattan	Invariant d'échelle	Small world
Nombre d'arcs à l'état initial	1 508	840	440	882
Nombre d'arcs à l'état après modification	1 502	846	486	892
Nombre d'arcs supprimés	24	10	13	16
Nombre d'arcs ajoutés	18	16	58	26

Tableau 14: Modification du réseau par topologie type

À titre d'illustration, deux figures ont été réalisées afin d'observer les changements topologiques sur le réseau initial. Pour le réseau Invariant d'échelle, la nouvelle version distribue l'intermédiarité de façon plus homogène. Le poids des « hubs » comme passages obligés sur de nombreux plus courts chemins est donc à présent diminué.



Pour estimer les effets des changements de réseau en cours de simulation, nous calculons le taux de variation moyen des rangs des villes. Pour cela, nous calculons le rang de chaque ville à mi-simulation et le rang en fin de simulation. Puis, pour chaque ville, nous calculons le taux de variation de leur rang dont on fait ensuite la moyenne. Ce calcul est effectué pour les simulations avec et sans modification de la structure du réseau.

Ce qui nous intéresse pour un réseau donné, c'est bien l'écart entre les taux de variation moyens, selon qu'il y ait une modification de la topologie ou non en cours de simulation. Si l'écart est fort, c'est que la modification de la topologie a eu un impact important sur la dynamique de hiérarchisation.

Les résultats du Tableau 15 montrent que les impacts des modifications sur le réseau au regard de l'étude des écarts des taux de variation moyens sont relativement faibles. Seul le réseau Small world a été réellement impacté par la modification de sa structure. Le résultat le plus marquant concerne l'écart entre les deux simulations se basant sur des distances-temps où le taux de variation moyen passe de 3 pour une simulation sans modification de la structure du réseau à 81. Vu qu'il y a peu d'intermédiaires entre les villes avec un degré moyen de connexion homogène, modifier le réseau peut rapidement conférer un potentiel d'interaction accru pour certaines villes, ce qui peut modifier l'ensemble des flux migratoires.

Précisions qu'une augmentation du nombre de « pas » *post* simulation n'a pas permis de modifier les tendances observées.

Distance	Simulation avec ou sans modification de la structure du réseau	Aléatoire	Manhattan	Invariant d'échelle	Small world
Topologique	SANS	6	66	3	24
Temps	SANS	2	7	4	3
Topologique	AVEC	7	66	5	36
Temps	AVEC	3	10	5	81

Tableau 15: Le taux de variation moyen des rangs par simulation (avec et sans modification de la structure du réseau)

Ainsi, les modifications réalisées ne changent pas grand-chose, sauf pour le réseau Small world. Les plus faibles variations moyennes (ou taux de variation moyen) s'observent pour le réseau Invariant d'échelle et pour le réseau Aléatoire. Pour le réseau Invariant d'échelle, le faible taux de variation moyen s'explique par le fait que la structure initiale du réseau conduit très vite à fixer la hiérarchie des villes, que la suite de la simulation ne fait que renforcer. À mi-parcours, le faible changement de structure du réseau ne parvient pas à renverser cette hiérarchie. Pour le réseau Aléatoire, qui a une forte connectivité initiale, les modifications de mi-parcours ne sont pas assez importantes pour changer sa logique d'accessibilité, la hiérarchie des villes n'est donc modifiée qu'à la marge. Pour le réseau de Manhattan, comme il produit des villes aux tailles très proches, les changements de rang se font tout au cours de la simulation. Il est très facile pour une ville de gagner ou perdre un rang hiérarchique, car la population des villes est relativement identique. À l'inverse, pour le réseau Small world, quelques modifications limitées de topologies conduisent à redéfinir assez largement les plus courts chemins, et donc la capacité de certaines villes à capter les flux migratoires.

Une modification relativement mineure de la structure ne semble donc pas entraîner de lourd changement. Il faudrait modifier un nombre d'arcs plus élevé pour modifier profondément la nature du réseau (ce qui est peu crédible dans une optique d'aménagement du territoire).

Pour ce qui est de l'aménagement du territoire, ces résultats montrent que l'impact d'une politique de transport qui viserait à redéfinir l'accessibilité pour impacter la hiérarchie urbaine aura des résultats très différents selon la logique du réseau considéré. Pour certains, comme le réseau Invariant d'échelle ou réseau Aléatoire, la *path dependency* semble importante et laisse peu de place à une possible redistribution des positions hiérarchiques. Pour d'autres au contraire,

des modifications mineures peuvent avoir un réel impact. Il est donc important avant tout de bien connaître la « logique » des réseaux sur lesquels on intervient.

À côté de la modification topologique des réseaux, lourde et chère, il est aussi possible d'agir sur la fonctionnalité des arcs, en modifiant par exemple les vitesses, ce qui paraît plus simple à réaliser.

### **2.3.2 Conséquences d'une augmentation des vitesses**

Si impacter la topologie des réseaux ne permet pas forcément, ou du moins efficacement et rapidement, de modifier la hiérarchie urbaine naissante, des changements de fonctionnalité impactant l'impédance des arcs pourraient avoir de meilleurs résultats.

Deux simulations ont été réalisées pour analyser l'effet des changements de vitesse sur la hiérarchie urbaine :

- Augmenter les vitesses en cours de simulation de tous les arcs (modification globale),
- Augmenter les vitesses seulement sur quelques arcs stratégiques qui connectent les plus petites villes entre elles : la création d'une « rocade » entre petites villes (modification locale).

#### **2.3.2.1 Modification des vitesses globales**

Si on commence une simulation avec des vitesses maximales autorisées à 50 km/h, puis qu'on passe à mi-simulation (au *ticks* 150 simulés sur 300) à 110 km/h, on modifie la possibilité de migrer vers des destinations plus lointaines pour un même coût, ce qui modifie donc l'attractivité relative des villes les plus lointaines. L'augmentation des vitesses reformate l'échelle de référence des interactions possibles. Ce type de simulation revient à étudier l'impact de l'arrivée de nouveaux modes de transports plus rapides (Bretagnolle, 2005, 2009).

Lors de la construction de chaque réseau, nous donnons une impédance à chaque arc. L'impédance est donc fonction de la longueur de l'arc et de la vitesse maximale permise (50km/h pour ce modèle).

$$\text{Impédance initiale} = \text{Longueur} / 50$$

Le Tableau 16 nous permet d'observer l'influence du changement de vitesse sur les propriétés générales et globales des réseaux de transport simulés. On observe que l'accessibilité globale de chaque réseau est améliorée. Les moyennes des plus courts chemins (Moyenne sp) sont logiquement divisées par deux pour tous les réseaux, puisque la vitesse a plus que doublé. Eta et l'indice de Shimbel diminuent aussi et traduisent une amélioration des potentiels d'interaction et donc de l'accessibilité globale du système, puisqu'il est désormais plus facile d'interagir entre chaque couple de villes.

Réseau	Diamètre km	Eta	Pi	Indice de Shimbel kilométrique	Moyenne des plus courts chemin
Aléatoire intermédiaire	14	2.6	266	1 265 848	6
Aléatoire finale	6	1.2	266	575 385	3
Manhattan intermédiaire	9	0.2	21	651 974	3
Manhattan finale	4	0.1	21	296 352	1
Invariant d'échelle intermédiaire	34	2.7	35	2 459 131	12
Invariant d'échelle finale	14	1.2	35	1 117 786	5
Small world intermédiaire	13	0.8	55	1 294 234	6
Small world finale	6	0.4	55	588 288	3

Tableau 16: Évolution des propriétés de chaque réseau une fois les vitesses modifiées

Pour étudier comment ces changements d'impédance influencent la hiérarchie urbaine, nous reprenons la même démarche que pour la simulation précédente en calculant le taux de variation moyen des rangs des villes. Le but est de mettre en regard ces taux de variation moyens selon qu'il y a eu ou pas augmentation des vitesses en cours de simulation.

Les résultats montrent qu'augmenter les vitesses n'a pas la même efficacité pour impacter la hiérarchie en fonction de la topologie des réseaux de transport. Les réseaux Aléatoire et Invariant d'échelle ont une hiérarchie qui reste relativement stable, contrairement aux réseaux de Manhattan et Small world.

	Aléatoire	Manhattan	Invariant d'échelle	Small world
Population initiale 50 1% de migrant	3	81	2	15
Population initiale 50 2% de migrant	4	75	2	21
Population initiale 100 1% de migrant	3	51	2	16
Population initiale 100 2% de migrant	3	57	2	15

Tableau 17: Le taux de variation moyen du rang des villes (après augmentation des vitesses)

La première chose à noter est la très faible variation moyenne pour les réseaux Invariant d'échelle et Aléatoire. Pour le réseau Invariant d'échelle, la moyenne des taux de variation des rangs après augmentation des vitesses est de 2. Les changements de vitesse ne parviennent pas à bouleverser la hiérarchie urbaine. Les villes intermédiaires, les *hubs*, vont continuer à capter la croissance exogène.

Le réseau Aléatoire et sa forte densité ne connaissent pas non plus de grands bouleversements de leur hiérarchie urbaine. Les valeurs sont comprises entre 3 et 4. L'accessibilité globale y est bien

meilleure, mais la structure continue à maintenir une inégalité de croissance due à l'inégal potentiel d'interaction.

*A contrario*, le réseau Manhattan connaît une grande instabilité de sa hiérarchie. Les valeurs sont comprises entre 51 et 81. Contrairement aux simulations qui modifient la structure du réseau où le réseau de Manhattan est perçu comme résilient, la modification des vitesses, et donc de l'impédance, modifie profondément la répartition de la croissance exogène. Le réseau de Manhattan est homogène dans sa structure et permet une accessibilité moyenne et globale bonne de toutes les villes, exception faite des villes en bordure du réseau. Le passage des vitesses de 50 km/h à 110 km/h donne quelques légères différences de potentiel d'interaction, ce qui permet alors de monter ou descendre dans la hiérarchie. Les villes perdent et gagnent des rangs hiérarchiques très facilement du fait de la faible différence de population entre elles.

Enfin, les moyennes des taux de variation du réseau Small world, comprises entre 15 et 21, s'expliquent par la bonne accessibilité qu'il offre aux villes et sa structure qui permet de limiter le nombre d'intermédiaires entre les villes. On peut désormais beaucoup plus facilement migrer vers toutes les villes du système. Ainsi, les villes ayant du mal à être attractives du fait d'une plus faible participation aux interactions peuvent désormais interagir avec l'ensemble du système.

Il apparaît donc qu'augmenter les vitesses est pertinent pour impacter la hiérarchie urbaine uniquement quand le réseau de transport ne confère pas à certaines villes une plus grande intermédiation, car peu importe les vitesses, il faudra toujours passer par celles-ci pour échanger.

Si l'augmentation des vitesses permet dans certains cas une redistribution des rangs, nous ne savons pas quelles villes sont concernées. La redistribution des rangs ne concerne pas forcément les plus petites villes du système. Nous avons tracé les courbes hiérarchiques juste avant l'augmentation des vitesses et à la fin des simulations. L'objectif est ici d'étudier si les plus petites villes (dernier décile) voient leur rang hiérarchique revu à la hausse. Les graphiques ci-dessous concernent les simulations avec des populations initiales de 100 et des taux de migration de 2%.

Pour le réseau Invariant d'échelle, l'augmentation des vitesses ne compense pas l'inégalité des potentiels d'interaction causée par la topologie. C'est le seul réseau où l'augmentation des vitesses ne permet pas aux plus petites villes d'être dans le 1er décile en fin de simulation.

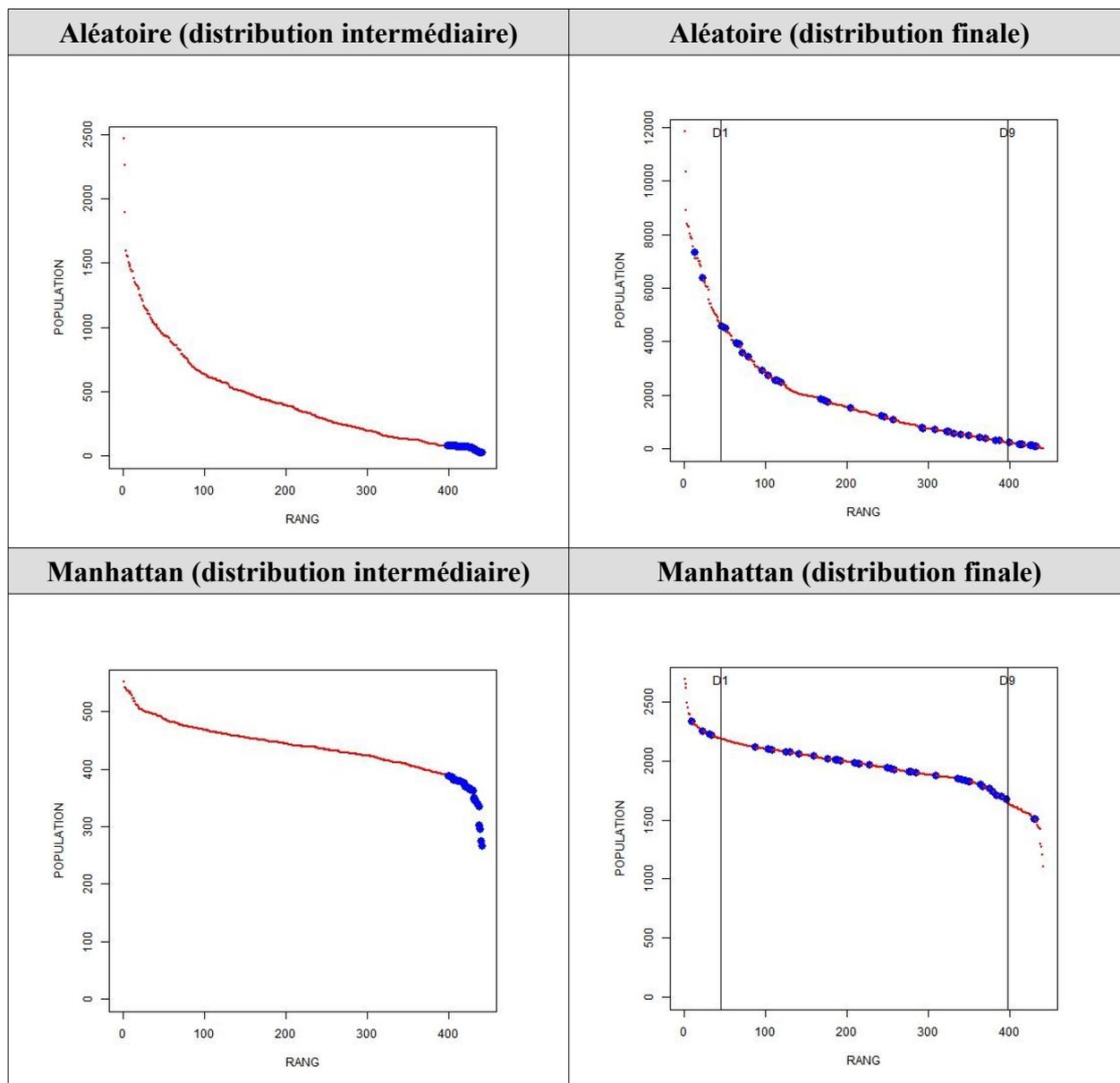


Figure 28: Évolution hiérarchique des plus petites villes (dernier décile) après augmentation des vitesses (en bleu les plus petites villes à l'état initial)

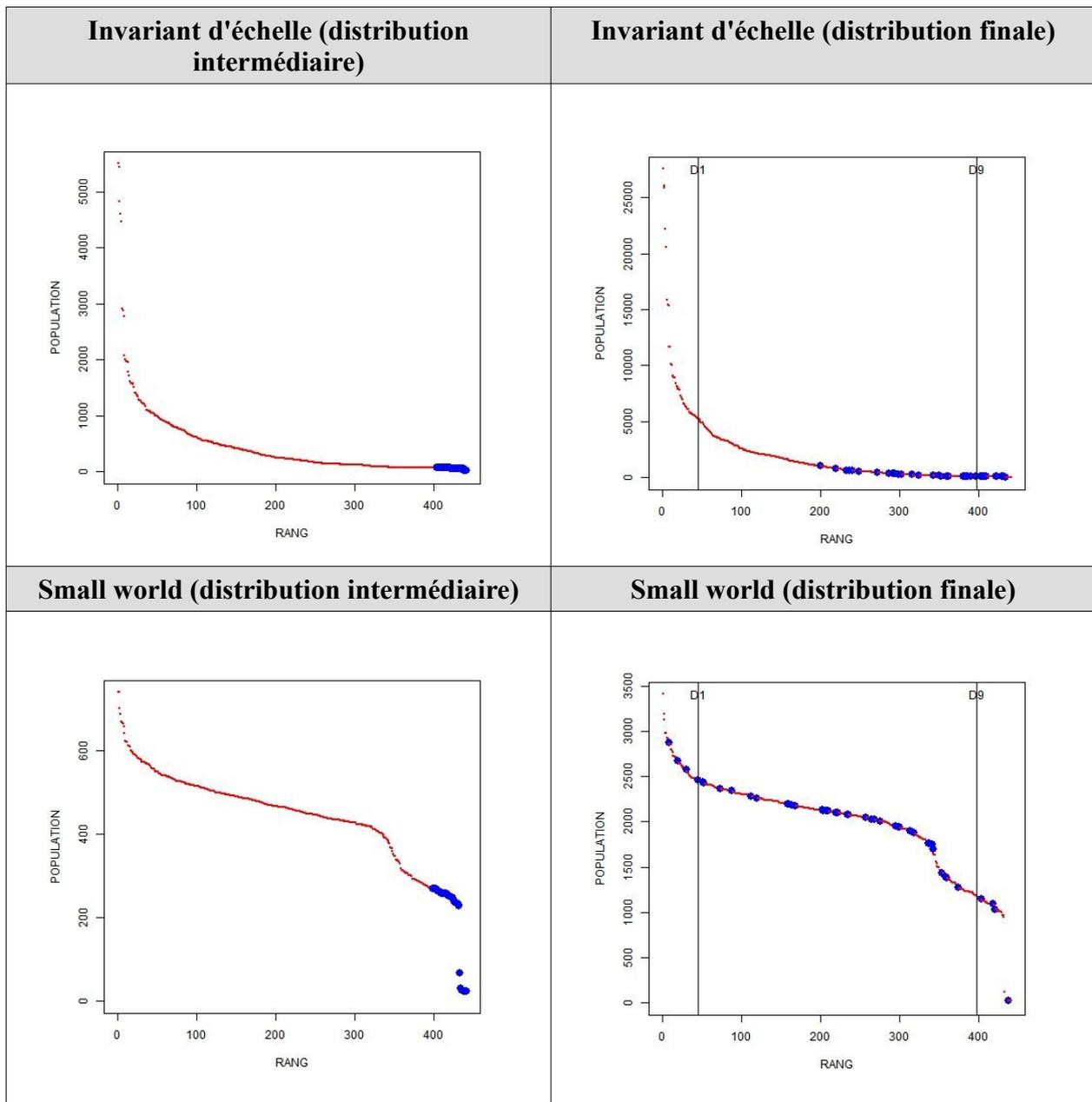


Figure 29: Évolution hiérarchique des plus petites villes (dernier décile) après augmentation des vitesses (en bleu les plus petites villes à l'état initial) (suite)

L'accessibilité s'améliore du fait de l'augmentation des vitesses. Cependant, l'accessibilité est fonction de l'impédance (des vitesses), mais aussi et surtout de la structure. Une ville qui ne garde qu'une connexion directe au système avec de nombreux intermédiaires verra son accessibilité augmenter, mais que très légèrement. Ses connexions directes en nombre réduit la maintiendront dans une situation d'inégalité par rapport à des villes fortement connectées à l'ensemble du système.

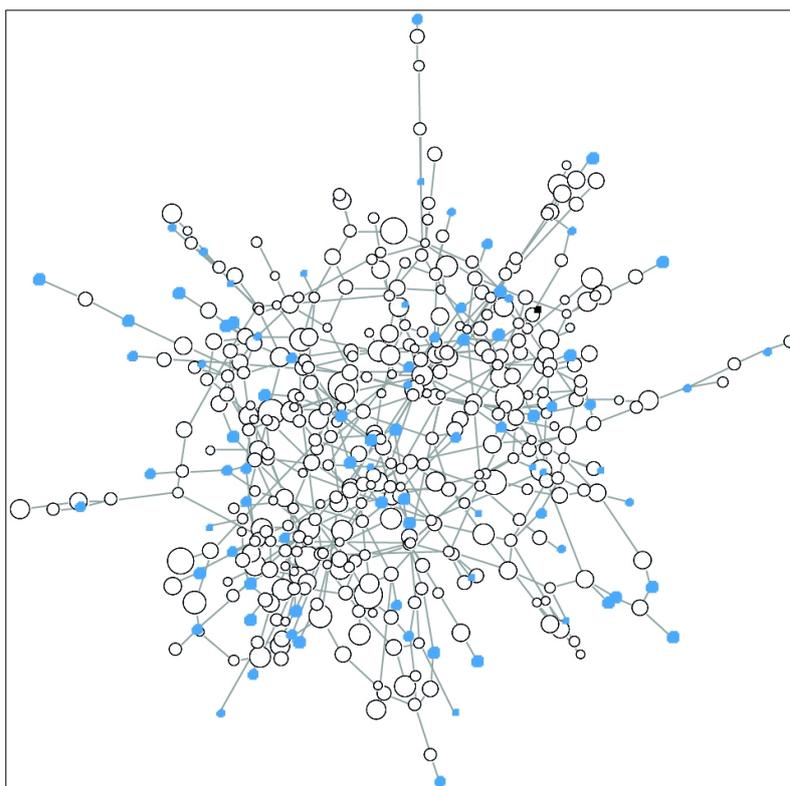
Donc, la structure du réseau a davantage d'influence sur la croissance des villes que l'amélioration des vitesses. Pour faire simple, améliorer les vitesses, inciter au développement de nouveaux modes de transport plus performants sans repenser la structure du réseau, ne suffit pas pour mener des politiques visant à redistribuer lourdement les interactions. Un réseau Invariant d'échelle, de par sa structure, favorisera toujours les échanges des villes intermédiaires, des *hubs*,

au détriment des villes faiblement connectées. La hiérarchie urbaine est bien plus résiliente au changement de mode de transport qu'à une modification de la structure du réseau.

Les opérations à conduire en termes d'aménagement du territoire, comme le changement de topologique ou modification des vitesses, dépendent donc de la logique des réseaux en place. Le même investissement n'aura pas les mêmes effets selon le territoire. Avant d'agir, il faut comprendre comment s'organisent les interactions à l'échelle du système de villes. Il semble d'autant plus pertinent de combiner les effets de la topologie avec l'impédance des arcs pour avoir un réel impact.

### ***2.3.2.2 Améliorer les relations entre les petites villes pour lisser la hiérarchie urbaine : le modèle « rocade »***

Toujours dans l'optique d'estimer dans quelle mesure la hiérarchie des villes peut être modifiée en jouant sur le réseau, et donc de tester l'inertie de la hiérarchie urbaine, une autre simulation a consisté à partir d'une hiérarchie de villes (441 villes) déjà établie, à relier les plus petites villes (population inférieure à 100) entre elles par des liaisons de qualité. La distribution des villes de départ se caractérise comme suit : le ratio entre la première et la dernière ville est de 33,2 (la plus grande ville a une population de 332 et la plus petite de 10). Les plus petites villes, qui sont au nombre de 85, sont ensuite reliées entre elles par des routes à grande vitesse qui représentent les autoroutes (130 km/h), alors que les autres le sont par des voies à 80km/h comme pour les routes nationales.



*Figure 30: Structure du réseau du modèle « rocade » (en bleu les plus petites villes)*

La création de cette « rocade » a pour objectif de contrebalancer la hiérarchie initiale en modifiant fortement le potentiel d'interaction des petites villes. En termes de résultats, et à titre

d'illustration, on peut voir que sur les vingt premières villes de la distribution hiérarchique finale, 17 sont à l'origine des « petites » villes pour une simulation portant sur 300 *ticks* (cf. Tableaux 19).

Cet effet positif pour les petites villes se renforce avec le temps. En effet, on observe que la part des « grandes villes », celles ayant une population supérieure à 100 au départ de la simulation, dans les 20 premières villes à la fin de la simulation, est plus faible quand on simule sur 300 *ticks* plutôt que sur 150 *ticks* : on en compte 10 pour les simulations sur 150 *ticks* contre seulement 3 sur la simulation à 300 *ticks*.

Ville	Population initiale	Population finale	Rang initial	Rang final	Catégorie taille
426	76	3 588	384	1	Petit
429	76	3 125	384	2	Petit
364	49	3 014	419.5	3	Petit
340	82	2 861	371	4	Petit
418	128	2 732	239.5	5	Grand
200	23	2 689	437	6	Petit
58	136	2 548	210	7	Grand
244	86	2 256	361.5	8	Petit
344	87	2 060	359	9	Petit
360	63	2 016	404.5	10	Petit
112	169	1 915	101.5	11	Grand
184	218	1 857	29.5	12	Grand
30	238	1 808	8	13	Grand
376	111	1 771	293.5	14	Grand
358	54	1 768	413.5	15	Petit
39	172	1 758	96	16	Grand
350	145	1 738	176	17	Grand
73	169	1 425	101.5	18	Grand
266	106	1 714	315	19	Grand
372	31	1 694	432	20	Petit

Tableau 18: Évolution du rang des villes modèle « rocade »  
(Simulation sur 150 *ticks*, taux de migration 2%)

Ville	Population initiale	Population finale	Rang initial	Rang final	Catégorie taille
426	76	25 544	384	1	Petit
429	76	24 278	384	2	Petit
344	87	18 183	359	3	Petit
360	63	16 795	404.5	4	Petit
364	49	14 959	419.5	5	Petit
340	82	17 782	371	6	Petit
346	84	14 414	365	7	Petit
200	23	13 760	437	8	Petit
58	136	12 999	210	9	Grand
380	6	12 801	398	10	Petit
372	31	12 758	432	11	Petit
151	79	12 352	375.5	12	Petit
150	26	11 955	434	13	Petit
267	18	11 446	438.5	14	Petit
244	86	11 289	361.5	15	Petit
418	128	11 211	239.5	16	Grand
161	57	10 853	410.5	17	Petit
266	106	10 298	315	18	Grand
310	78	10 271	377.5	19	Petit
373	75	10 249	386.5	20	Petit

*Tableau 19: Évolution du rang des villes modèle « rocade »  
(Simulation sur 300 ticks, taux de migration 2%)*

Une modification drastique et ciblée du réseau en faveur des plus petites villes (mais qui reste peu crédible dans la pratique) permet donc bien de modifier la distribution de la croissance exogène en faveur de celles-ci.

Les distributions ci-dessus illustrent l'efficacité théorique d'un changement drastique dans la structure d'un réseau pour favoriser la croissance des plus petites villes. Les plus petites villes, celles qui ont à l'état initial une population inférieure à 100, sont bien redistribuées dans la hiérarchie urbaine finale. Le sommet des distributions hiérarchiques est formé par des villes ayant bénéficié du changement morphofonctionnel du réseau de transport.

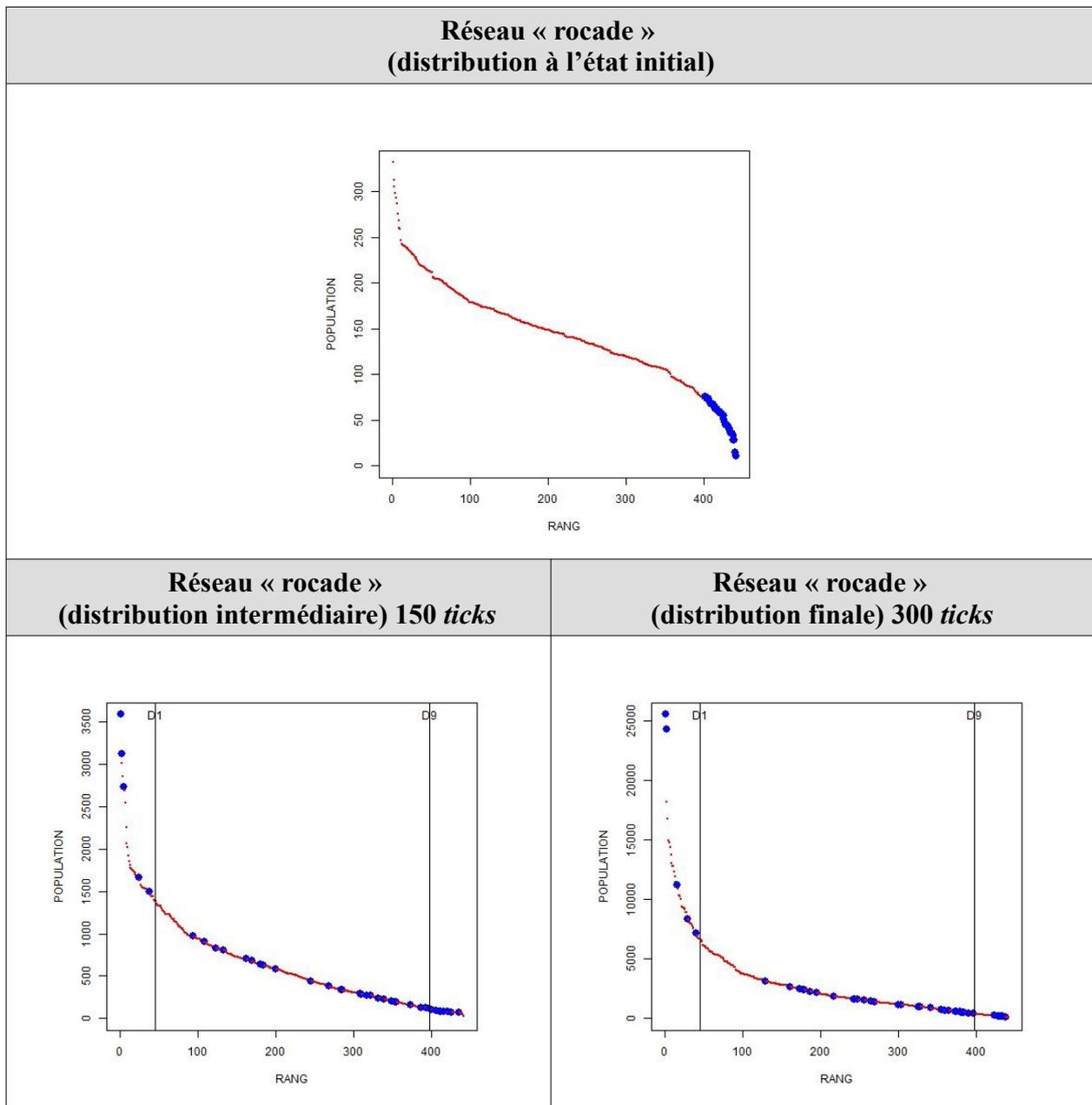


Figure 31: Évolution hiérarchique des plus petites villes (population inférieure à 100), modèle « rocade ». En bleu, les plus petites villes à l'état initial

On voit donc ici qu'une politique d'aménagement qui viserait sciemment à privilégier les interactions entre petites villes grâce à de meilleures infrastructures est en mesure de faire bouger la hiérarchie urbaine. Toutefois, une telle politique relevant de l'équité paraît peu probable, car les aménagements routiers se font selon une logique d'efficacité qui conduit préférentiellement à privilégier les liaisons les plus fréquentées et donc, *in fine*, les liaisons entre grandes villes (Boiteux, 2001).

### 2.3.3 L'impact de la « fusion » entre deux systèmes de villes ayant évolué séparément

Modéliser la fusion entre deux systèmes de villes qui ont évolué séparément vise à étudier les conséquences d'une intégration territoriale soudaine sur les hiérarchies propres à chaque système initialement autonome. Par exemple quelles villes vont gagner ou perdre des places dans la

hiérarchie ? La ville au sommet de la hiérarchie est-elle forcément l'une des villes au sommet avant la fusion ? Etc.

Pratiquement, deux systèmes ayant leurs propres caractéristiques, leur propre structure de réseau de transport, vont ainsi être connectés à l'aide de 4 nouveaux arcs en cours de simulation. On connecte les réseaux par un nombre restreint d'arcs afin de représenter des connexions limitées, comme cela peut se produire entre deux pays frontaliers par exemple.

Deux simulations ont été réalisées :

- **Version 1** : Deux réseaux aléatoires A et B, composés de 180 villes et 567 arcs pour l'un et 180 villes et 560 pour l'autre fusionnent par l'intermédiaire de la création de 4 nouveaux arcs de façon à former un réseau connexe. La localisation des nouveaux arcs s'est faite « à l'œil », en visant :

- à connecter des villes en bordure de chaque réseau (pour représenter des tronçons routiers liant des villes frontalières)

- à connecter deux villes situées au centre de leur système respectif, pour figurer par exemple une liaison majeure entre deux capitales.

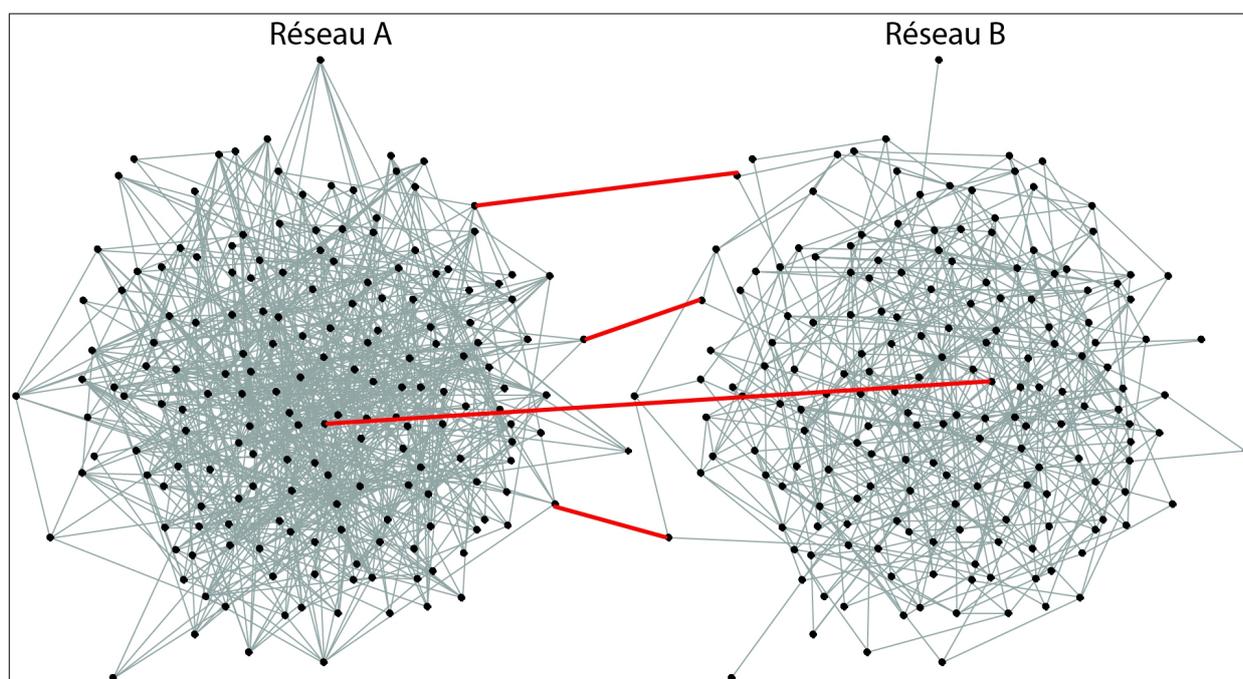


Figure 32: Représentation schématique de la fusion des deux réseaux de villes (réseau Aléatoire) A et B.  
En rouge les 4 arcs qui les connectent

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des deux réseaux initiaux et du réseau correspondant à leur interconnexion.

La fusion des deux réseaux aléatoires n'entraîne pas un profond changement des caractéristiques du réseau, si ce n'est une augmentation de son diamètre et la (logique) augmentation de ses plus courts chemins. Ce constat est naturel, vu qu'il existe plus de couples de villes à relier. Enfin, les 4 nouveaux arcs mettent en position d'intermédiation les villes qu'ils connectent en faisant d'eux des points de passage privilégiés pour échanger entre des villes de ces deux systèmes initialement isolés.

Indicateur	Réseau A	Réseau B	Réseau fusion
Diamètre	5	6	9
Nombre cyclomatique	388	381	722
Degré connectivité	28	28	57
Eta	1	1	1
Pi	113	93	125
Indice de Shimbel topologique	96 748	98 014	558 014
Moyenne des plus courts chemins	3	3	4

Tableau 20: Propriétés des réseaux (version 1)

Pour mesurer si la mise en relation de ces deux systèmes autonomes impacte fortement la situation relative des villes nous les avons classés en fonction de leur position dans le premier décile (villes rouges), dernier décile (villes bleues) ou dans une situation intermédiaire (villes vertes) dans la distribution hiérarchique avant fusion (A ou B), puis on a comparé cette position à la situation en fin de simulation (après fusion).

Les résultats montrent que les plus grandes et plus petites villes des réseaux A et B gardent globalement leur position initiale malgré la fusion. Quelques villes intermédiaires se retrouvent cependant au sommet de la hiérarchie finale.

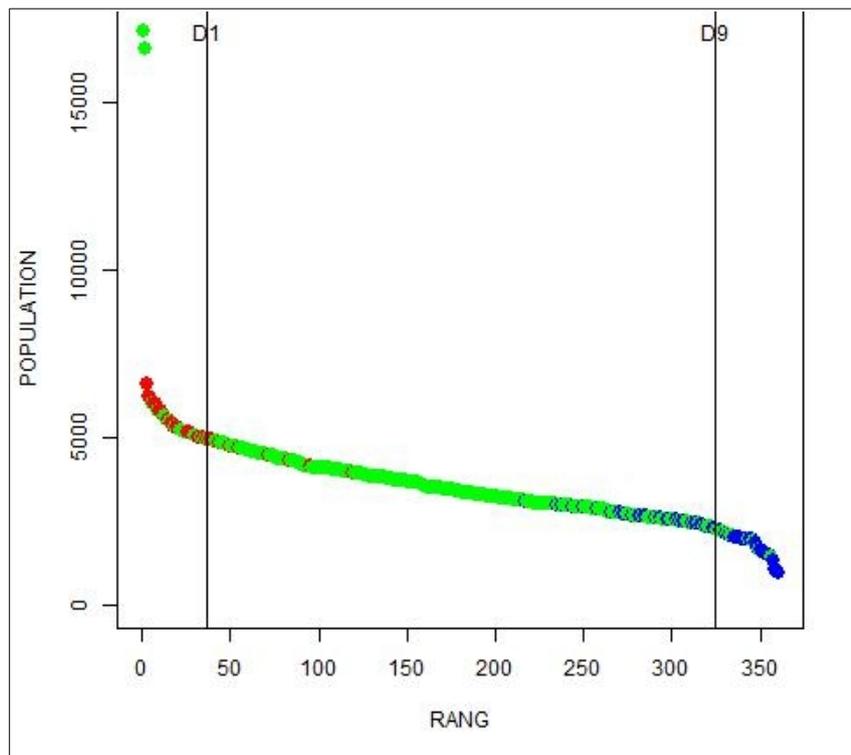


Figure 33: Position hiérarchique des villes selon leur classe (en rouge les villes du 1er décile, en bleu les villes du dernier décile et en vert les villes intermédiaires) après fusion des réseaux A et B (version 1)

***Ainsi, la connexion de deux réseaux Aléatoires, ne permet pas une redistribution générale des potentiels d'interaction à même de bousculer fortement l'ordre hiérarchique initial.***

- **Versión 2** : Pour la seconde simulation, deux réseaux Invariant d'échelle A et B, composés de 180 villes et 180 arcs pour l'un et 180 villes et 180 pour l'autre, fusionnent par l'intermédiaire de la création de 4 nouveaux arcs de façon à former un réseau connexe. La logique de localisation des nouveaux arcs reste la même que précédemment : créer trois arcs qui connectent des villes en bordure de chaque réseau et créer un arc qui connecte deux villes au centre de leur système.

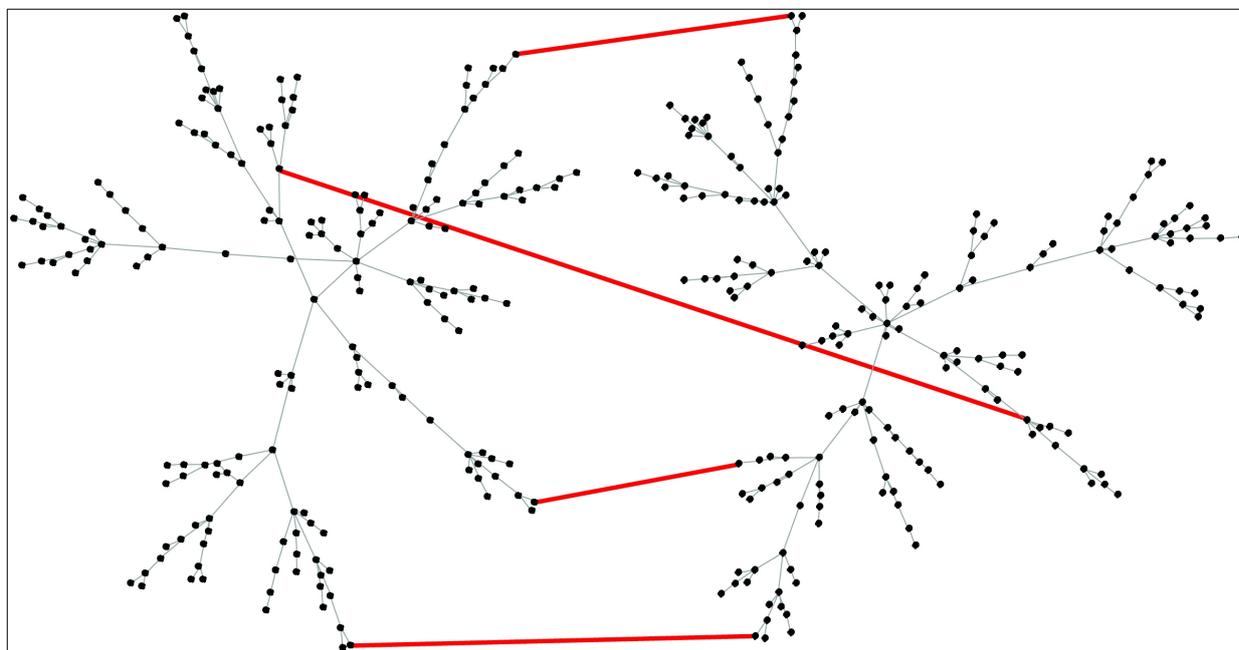


Figure 34: Représentation schématique de la fusion des deux réseaux de villes (réseau Invariant d'échelle) A et B. En rouge les 4 arcs qui les connectent

Cette fusion modifie une caractéristique majeure de ce type de réseau. En effet, le nombre cyclomatique passe de 0 à 3 et le degré de connectivité de 90 à 178, le poids des nœuds intermédiaires diminuent donc. On s'attend donc à ce que cette modification de la structure du réseau lisse la structure hiérarchique en permettant à certaines villes de combler leur retard de croissance urbaine.

Indicateur	Réseau A	Réseau B	Réseau fusion
Diamètre	16	15	24
Nombre cyclomatique	0	0	3
Degré connectivité	90	90	178
Eta	0,9	0,9	1
Pi	11	2	15
Indice de Shimbel topologique	259 380	234 952	1 366 240
Moyenne des plus courts chemins	8	7	11

Tableau 21: Propriété des réseaux (version 2)

Comme précédemment, nous avons classé les villes selon leur position dans leur système initial : en rouge dans le premier décile, en bleu dans le dernier décile, en vert pour le reste.

Les résultats montrent que la fusion de deux réseaux de type Invariant d'échelle modifie la nature et la structure hiérarchisée et arborisée des réseaux initiaux. La conséquence de cette fusion est la diminution de l'intermédiarité de quelques villes, la création de chemins alternatifs entre couples

de villes et la redistribution des potentiels d'interaction. Cette fusion favorise la croissance urbaine de villes jusqu'alors peu accessibles. La distribution hiérarchique ci-dessous permet de visualiser une redistribution des rangs assez générale où on peut retrouver dans le premier décile final des petites villes d'avant fusion.

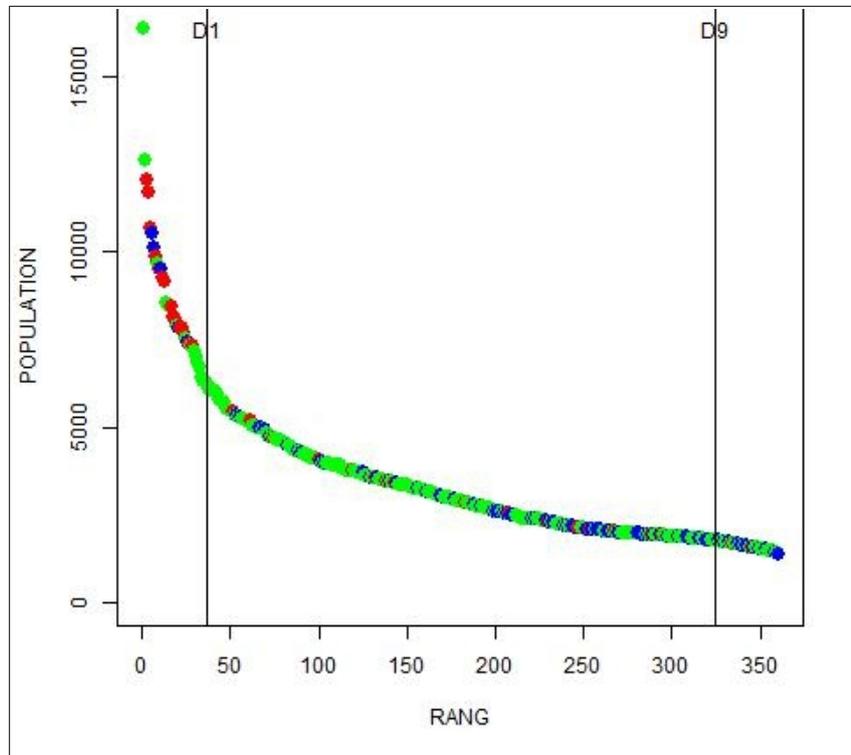


Figure 35: Position hiérarchique des villes selon leur classe (en rouge les villes du 1er décile, en bleu les villes du dernier décile et en vert les villes intermédiaires) après fusion des réseaux A et B (version2)

Faire fusionner deux systèmes de villes ayant évolué séparément ne permet pas forcément de modifier l'ordre établi. On constate l'importance de la nature du réseau sur la stabilité de la hiérarchie. Faire fusionner deux réseaux denses (réseaux Aléatoires) ne permet pas de modifier la logique hiérarchique car la nature du réseau n'est pas fondamentalement modifiée. ***A contrario, faire fusionner deux réseaux de type Invariant d'échelle, et ce avec seulement quelques nouveaux arcs, permet de modifier profondément leurs caractéristiques et in fine de changer les logiques hiérarchiques établies.***

Dans une vision mondialisée des interactions, considérer un système de villes isolé paraît peu pertinent. Tout comme pour les villes, les pays et régions ne produisent pas les mêmes biens et services et ne sont pas spécialisés dans les mêmes savoir-faire. L'interaction dépasse alors bien souvent les frontières et limites des systèmes. Si les migrations se font principalement en interne, certains pays ont une attractivité résidentielle et une portée commerciale qui dépassent leur frontière. Ils vont connaître une croissance de leurs villes par l'intermédiaire des réseaux qui les connectent à leurs voisins et au reste du Monde. Il faut donc considérer les systèmes de villes à une échelle globale afin de comprendre la croissance future des villes. Précisons toutefois, que la tendance très contemporaine en certains lieux au repli sur l'État-nation, se matérialisant par des

barrières douanières en hausse, pourrait justifier la simulation inverse à savoir la fragmentation de systèmes de villes en plus petits sous-systèmes.

### **2.3.4 Conclusion sur la *path dependency***

On a pu voir que les hiérarchies dans les systèmes de villes obtenus par simulation dépendaient en partie de la structure morphofonctionnelle des réseaux. Il était donc tentant de voir si cette structure morphofonctionnelle pouvait jouer le rôle de levier d'aménagement pour modifier un système de villes une fois celui-ci établi, ce qui revenait à tester « l'effet structurant » attribué traditionnellement aux réseaux de transport.

Les simulations réalisées ont permis de montrer que s'il est effectivement possible de modifier la hiérarchie des villes en modifiant les réseaux, cela ne peut se faire qu'en passant par des modifications très lourdes à la fois en termes de topologie et de fonctionnalité des arcs. Ces modifications, par exemple relier les plus petites villes entre elles et dégrader les connexions des plus grosses villes, apparaissent peu crédibles dans la pratique. Difficile de penser que l'on va dégrader à grands frais les connexions des plus grandes villes qui sont les moteurs économiques des territoires sous prétexte de « rééquilibrer » la hiérarchie urbaine.

Ainsi, nos simulations relativisent donc fortement l'effet structurant attribué aux réseaux. La *path dependency* est forte. Une fois une structure en place, il est difficile de l'infléchir en jouant sur les seuls réseaux, même si cette difficulté apparaît variable selon la logique du réseau considéré, certains étant plus sensibles que d'autres et impactant *in fine* plus que d'autres sur la taille des villes.

Jusqu'à présent, nos modélisations n'ont mobilisé que des configurations théoriques, dans une perspective exploratoire visant à voir l'impact de différentes logiques d'interaction et de différents idéaux types de réseaux sur la hiérarchie dans les systèmes de villes.

***Si ces simulations ont permis de faire émerger des structures hiérarchiques, aucune n'a en revanche permis d'aboutir à une distribution rang-taille correspondant à la théorie.***

***Même si cette distribution rang taille n'est qu'un modèle théorique, avec beaucoup de résidus dans la réalité (ne pas retrouver ce modèle peut donc ne pas être vu comme un « échec total »), nous avons néanmoins poursuivi nos simulations pour voir si en utilisant, non plus des données théoriques, mais des configurations réelles, il était possible ou pas de retrouver ces distributions rang-taille. Travailler avec des données empiriques doit aussi permettre de voir si les résultats obtenus avec notre modèle sont « crédibles » au regard des configurations empiriques.***

## **2.4 Tester le modèle sur des données historiques**

Le modèle d'interaction spatiale a été utilisé avec des données en partie historiques afin d'étudier la crédibilité des distributions hiérarchiques obtenues au regard de la loi rang-taille et des observations empiriques.

Il ne s'agit donc pas de retrouver *stricto sensu* les configurations réelles, qui dépendent de trop nombreux paramètres (historiques, économiques, etc.) qui ne sont pas intégrés dans notre démarche KISS.

### 2.4.1 Construction du modèle

Contrairement à nos configurations théoriques, dans la réalité les villes ne sont pas distribuées de façon homogène. Leur localisation correspond à des logiques spatiales telles que la recherche de la proximité à l'eau ou à des terrains fertiles. Utiliser des données empiriques permet donc d'intégrer d'emblée ces inégalités de répartition pour en voir les effets sur les distributions obtenues.

Dans cette perspective nous avons utilisé les fichiers Euratlas<sup>15</sup> donnant la localisation des villes situées dans l'actuelle France et sa proche périphérie (Italie, Suisse, Allemagne, Belgique, Pays-Bas) en l'an 300. Nous avons ainsi récupéré la localisation de 163 lieux habités<sup>16</sup>.

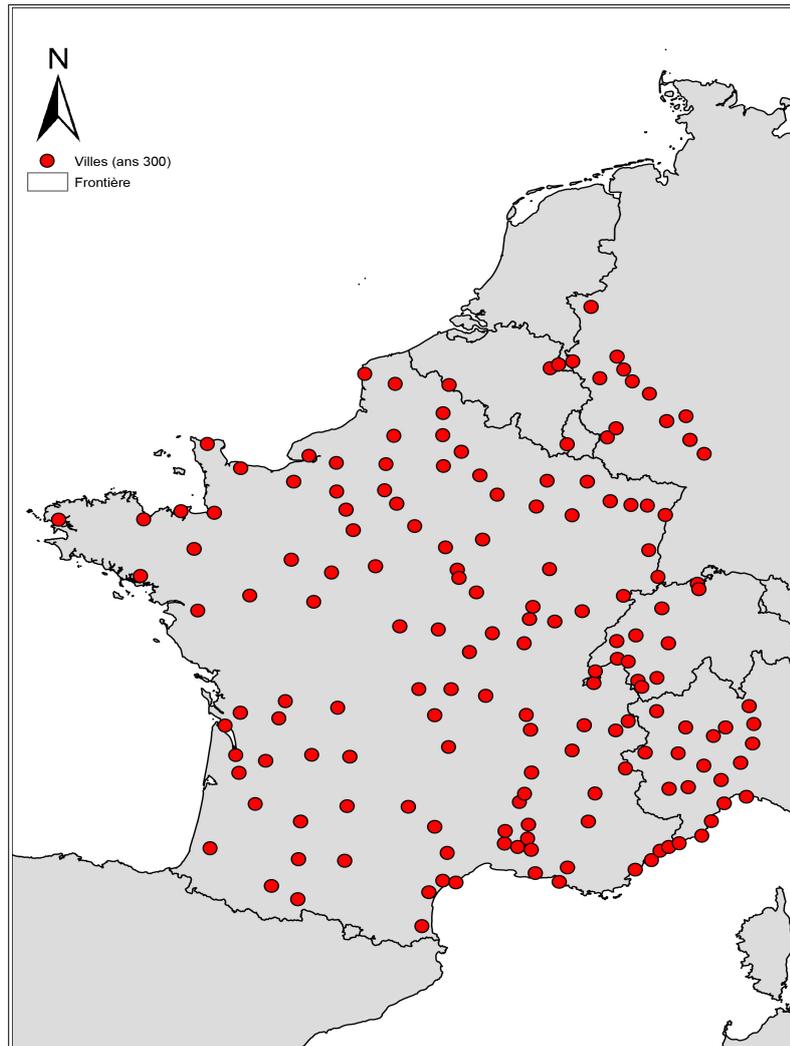


Figure 36: Localisation des « lieux habités » en l'an 300  
(source : Euratlas)

À défaut d'avoir le réseau de transport de l'époque, nous avons créé trois réseaux construits avec trois logiques différentes pour avoir un système de villes connectées. Utiliser des localisations réelles est aussi un moyen de réaliser des simulations avec des distances correspondant à une réalité concrète, ici l'échelle du pays.

15 [https://www.euratlas.net/shop/maps\\_gis/gis\\_300.html](https://www.euratlas.net/shop/maps_gis/gis_300.html)

16 [https://www.euratlas.net/shop/bibliography/gis\\_300.html](https://www.euratlas.net/shop/bibliography/gis_300.html)

Les trois réseaux construits sont :

- **Réseau plus proche voisin ou « Voisin »**

Via *QGIS* (V 2.18.28), et l'outil « matrice des distances », nous utilisons la matrice de distance linéaire ( $N \times k \times 3$ ) où  $k = 4$  afin d'obtenir pour chaque ville ses 3 plus proches voisins. Nous enlevons du résultat tous les liens de chaque ville vers elle-même pour lesquels la distance est égale à 0. Puis nous supprimons les doublons.

- **Réseau « P-C » (Proximité-Contribution)**

La création de ce réseau est la même que celle réalisée précédemment (cf.2.2.7). Le réseau est basé sur l'interaction antérieure entre chaque ville. Il connecte prioritairement les villes qui échangent intensément.

- **Réseau « Triangle »**

Ce réseau a été construit en faisant une triangulation de Delaunay. On appelle « triangle de Delaunay un triangle qui a comme sommets trois sites et tel que son cercle circonscrit n'ait en son intérieur strict aucun site »<sup>17</sup>. Les sites sont les villes du système de villes qu'il faut relier par un réseau connexe. Chaque triangle aura alors pour sommet trois villes choisies sur une logique de proximité. Toutes les villes seront connectées et aucune ville ne sera dans un des triangles obtenus. La triangulation de Delaunay permet d'obtenir un réseau « homogène », elle crée un treillage du territoire permettant de connecter rapidement toutes les villes entre elles sans de fortes inégalités de connexion. Cependant, certains arcs ont été ensuite supprimés afin d'éviter des tracés passant par l'océan ou la mer. Cela a alors réduit le potentiel d'interaction de certaines villes, notamment celles en bordure du système. Ce réseau a été créé sous *QGIS* (V 2.18.28) avec l'outil « v.delaunay ». Nous avons alors obtenu de nombreux triangles qui ont été convertis en arcs sous *Arcgis* avec l'outil « Polygone vers ligne ».

- **L'étape de « nettoyage » du réseau**

Pour ces trois réseaux, nous avons ensuite supprimé les possibles doublons à l'aide de l'outil « Supprimer les géométries dupliquées » de *QGIS*, ainsi que les arcs passant dans l'océan ou la mer afin de traduire certaines contraintes spatiales à défaut d'avoir intégré le relief. On obtient trois réseaux ayant chacun leur particularité. Le réseau « Voisin » et le réseau « Interaction » sont assez similaires, quand le réseau « P-C » se distingue par la présence de « cliques » bien marquées. Le réseau n'est connexe que par la présence de quelques arcs permettant de relier ces cliques. On s'attend à une interaction privilégiée entre les villes de ces sous-ensembles tout en octroyant des positions privilégiées pour les villes qui les connectent au reste du réseau.

---

<sup>17</sup> <http://www.pierreaudibert.fr/ens/11-Triangulation.pdf>

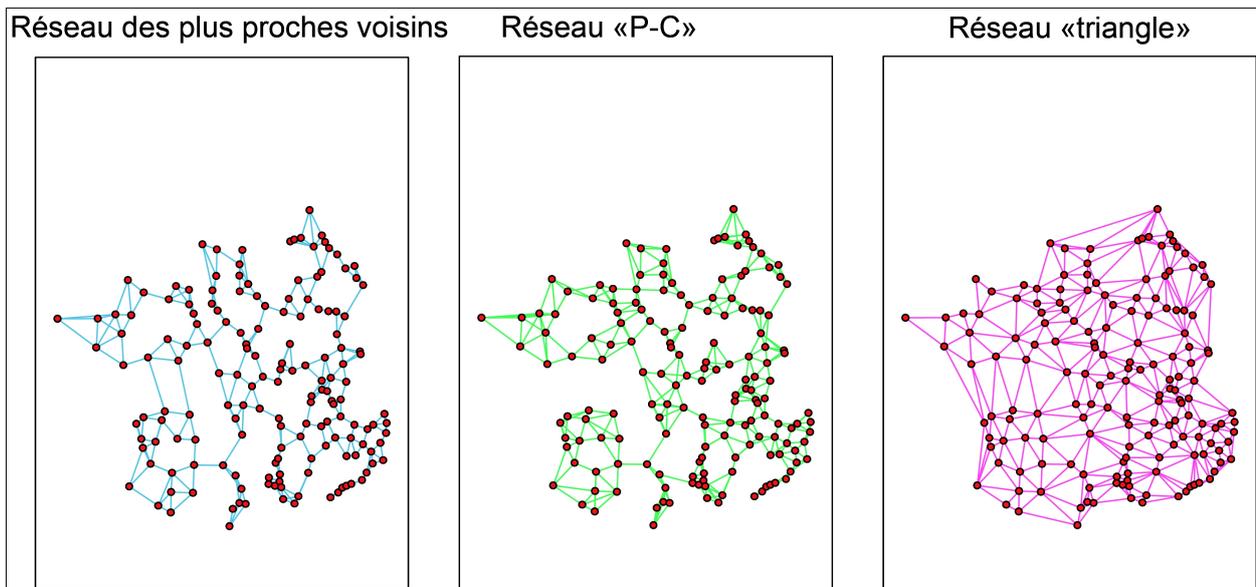


Figure 37: Les trois réseaux théoriques construits

Le réseau « P-C » a un degré de connectivité de 33 et un nombre cyclomatique de 237 ce qui en fait un réseau plus dense, mais avec moins de chemins alternatifs que le réseau « Voisin ». Le réseau « Triangle » est plutôt dense et permet un treillage assez complet du territoire avec une connexion de chaque ville relativement identique à celui de ses voisins. Ce dernier réseau se rapproche alors d'un réseau Small world avec beaucoup de chemins alternatifs. Son nombre cyclomatique et son Pi sont les plus élevés, et son indice de Shimbel est le plus faible. C'est le réseau qui facilite le plus l'interaction entre chaque couple de villes.

Indicateur	Réseau des plus proches voisins	Réseau P-C	Réseau Triangle
Diamètre	30 402	27 522	23 547
Nombre cyclomatique	143	237	293
Beta	2	2	3
Degré connectivité	43	33	29
Eta	1 184	1 282	1 552
Pi	11	18	30
Indice de Shimbel	320 584 990	297 568 428	249 257 108
Moyenne des plus courts chemins	12 066	11 199	9 381

Tableau 22: Propriétés des réseaux théoriques construits

Pour les simulations se basant sur les localisations historiques des villes et les trois réseaux construits, les paramètres utilisés ont été les suivants :

- Le taux de migration a été de 0.2%, 1% ou 2%,
- Population initiale de chaque ville : homogène 50, 100 ou 300, ou non homogène (on tire aléatoirement le fait pour une ville d'avoir plus ou moins 25 habitants). Cette distribution inégale est la même pour chacune des simulations.

#### **2.4.2 De la hiérarchie, mais pas de rang-taille**

À nouveau, nous comparons la distribution hiérarchique obtenue avec la rang-taille théorique et étudions le « poids » du sommet de la hiérarchie par rapport aux dernières villes. Afin de continuer à apprécier la qualité des hiérarchies obtenues, ces dernières ont été comparées avec la distribution hiérarchique actuelle de ces mêmes villes (date de recensement entre 2017 et 2018 selon les pays de la zone d'étude).

Le fait que la population initiale de chaque ville soit homogène ou non n'a pas eu de réel impact sur les résultats, car ce n'est pas un paramètre déterminant : seuls les paramètres de l'interaction le sont. Les distributions hiérarchiques ci-dessous (cf. Figure 38) sont représentatives de la structure globale que prennent l'ensemble des simulations réalisées. Les résultats pour les différents types de réseaux montrent que dans tous les cas émergent des hiérarchies. Cependant, aucune de ces hiérarchies ne correspond à la structure hiérarchique des villes actuelles ou d'une rang-taille.

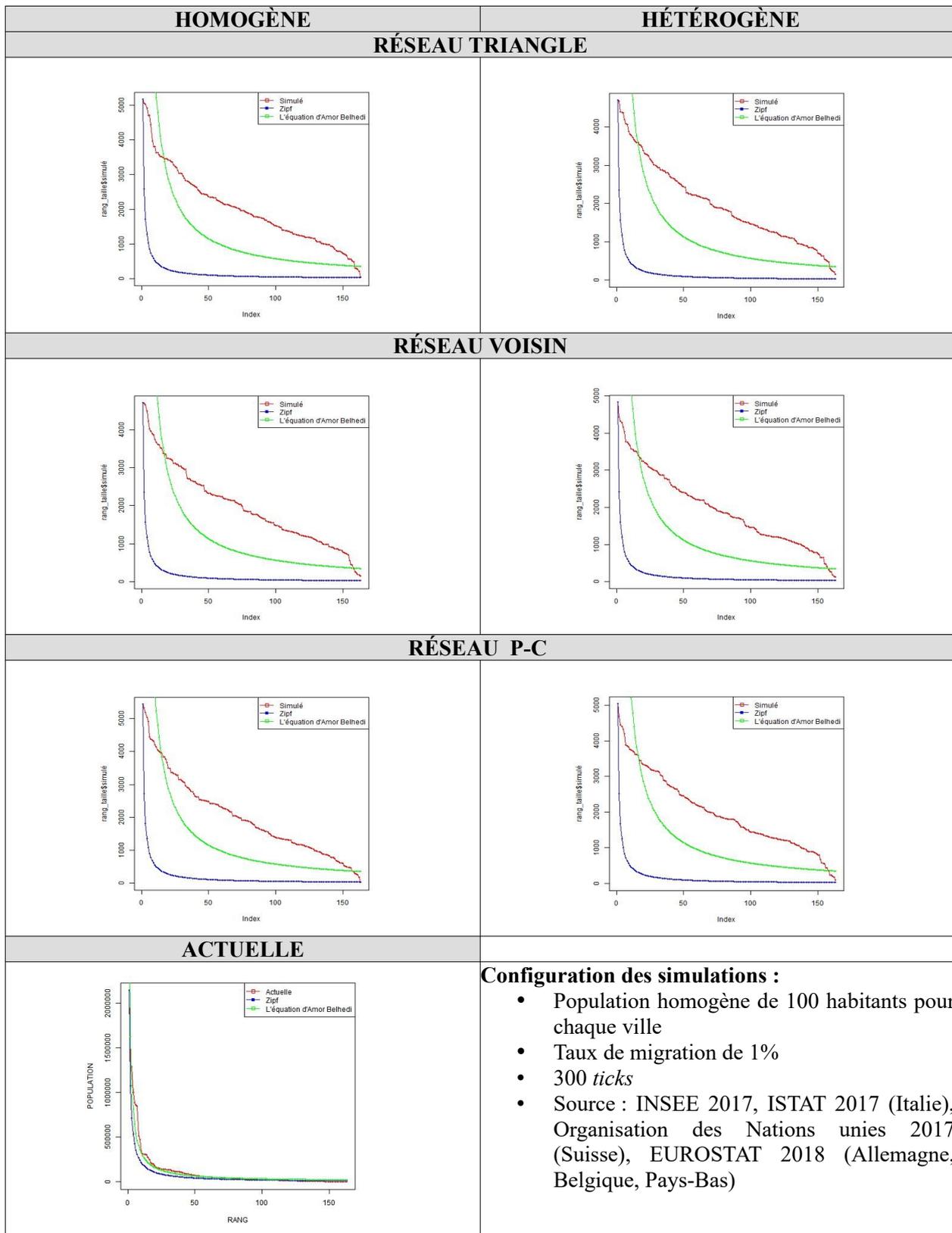


Figure 38: Comparaison des distributions hiérarchiques obtenues et de la distribution actuelle des villes modélisées avec les modèles théoriques (modèle géo-histoire)

L'observation des écarts à Zipf et aux ratios entre la taille des premières et dernières villes montre que nous n'obtenons pas de distribution hiérarchique des villes selon une rang-taille. Premièrement, les écarts à la loi rang-taille sont marqués puisqu'on atteint des résultats compris

entre 148 061 milliers (réseau P-C, population de 50 hétérogène, taux de migration de 2%), et 297 960 milliers (réseau Triangle, population de 50 homogène, taux de migration de 2%). Reportés au nombre de villes simulées, les écarts sont alors compris entre 908 et 1 823 tandis que pour les simulations théoriques précédentes, les écarts étaient compris entre 0.7 et 1.9 .

Réseau	Population initiale	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)	Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé)
Triangle	50	1	153 806	51	14
Triangle	50	2	152 250	131	15
Triangle	100	1	297 100	99	11
Triangle	100	2	285 040	204	14
Triangle	[26;74]	1	159 218	67	13
Triangle	[26;74]	2	150 443	116	15
Triangle	[76;124]	1	294 600	31	11
Triangle	[76;124]	2	294 978	208	14
Voisin	50	1	155 553	48	14
Voisin	50	2	149 699	131	17
Voisin	100	1	293 364	31	12
Voisin	100	2	289 354	164	16
Voisin	[26;74]	1	154 291	58	15
Voisin	[26;74]	2	155 013	115	15
Voisin	[76;124]	1	289 383	40	12
Voisin	[76;124]	2	297 960	190	15
P-C	50	1	156 540	53	14
P-C	50	2	148 061	124	14
P-C	100	1	295 817	208	15
P-C	100	2	296 114	180	14
P-C	[26;74]	1	155 083	58	14
P-C	[26;74]	2	290 489	44	10
P-C	[76;124]	1	296 533	50	12
Villes actuelles			7 101	9776	2

Tableau 23: Comparaison aux modèles théoriques (modèle géo-histoire). En rouge, les valeurs maximales et en bleu, les valeurs minimales pour chaque réseau

Il y a donc un écart marqué entre les distributions obtenues par simulation et la distribution rang-taille théorique. Les ratios entre les tailles des premières et dernières villes montrent que l'inégalité de peuplement entre les villes est moins forte que pour les simulations précédentes. Le ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé) est compris entre 31 et 208 (contre 39 et 1140 pour les simulations théoriques en distance-temps). Puis, le ratio entre la taille moyenne

du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé) est compris entre 10 et 17 (contre 14 et 672 pour les simulations théoriques en distance-temps).

À l'étude des résultats, il semble qu'il y ait relativement peu de différence dans les distributions hiérarchiques obtenues par ces trois nouveaux réseaux théoriques. Aucun d'eux ne donne des résultats semblables aux simulations réalisées avec les topologies de réseau type. Les seules similitudes sont au niveau du ratio entre la taille de la première et la taille de la dernière ville simulée où les valeurs se rapprochent de celles du réseau Small world (valeurs entre 98 et 207) et du réseau de Manhattan (valeurs entre 39 et 175). Pour le ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile, les valeurs se rapprochent de celles du réseau de Manhattan (valeurs entre 14 et 21). Les hiérarchies sont moins discriminantes, avec un écart de peuplement entre le sommet et le bas de la hiérarchie qui ne correspond pas à une distribution de type rang-taille.

Ces résultats s'expliquent par la structure des réseaux support des simulations. Très peu de villes sont isolées et ne possèdent qu'une connexion directe au système, à l'inverse d'un réseau Invariant d'échelle. Ces structures offrent alors la possibilité à chaque ville de capter des flux migratoires et de maintenir sa croissance urbaine. Les distributions obtenues sont alors moins inégalitaires et c'est pour cela qu'elles s'écartent de la distribution hiérarchique actuelle. Ensuite, la distribution des villes actuelles est proche des distributions rang-taille théoriques. Cependant, la comparaison entre la hiérarchie des villes actuelles et celles simulées n'est pas forcément pertinente. Nous avons pris des villes hors de leur contexte territorial. Toutes les villes étudiées ne font pas partie du même système national et interagissent avec des villes qui ne figurent pas dans les simulations. Les logiques d'interactions et de croissances ne sont alors pas comparables. Toutes ces villes ne font pas partie du même système national et doivent être étudiées sous le prisme de leur système de villes respectif, dans lequel le nombre de villes est bien plus important qu'en l'an 300.

Après avoir simulé avec les mêmes valeurs de paramètres que les modèles théoriques, nous avons réalisé une simulation avec un taux de migration réduit de 0.2% et une population initiale de 300, qui permet de simuler avec des valeurs qui nous semblent plus crédibles pour représenter les conditions de croissance urbaine en l'an 300. Nous n'avons pas de données concernant le peuplement de cette période. Nous décidons alors d'augmenter la population initiale et de diminuer le taux de migration, car nous supposons pour des foyers de peuplement de plus grandes tailles une plus grande difficulté à migrer.

L'observation des écarts à Zipf et aux ratios entre la taille des premières et dernières villes semble indiquer deux points. Premièrement, les écarts à la loi rang-taille sont marqués puisqu'on atteint des résultats compris entre 889 906 et 919 267 (soit des écarts, rapportés au nombre de villes, de 5 460 et 5 640). Deuxièmement, les ratios calculés montrent que l'inégalité de peuplement entre les villes est moins forte que pour les simulations précédentes (cf. Tableau 24). Le ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé) est compris entre 3 et 4. Puis le ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé) est compris entre 2 et 3. L'inégalité de peuplement entre le sommet et le bas de la hiérarchie est faible.

Réseau	Population initiale	Taux de migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)	Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé)
Triangle	300	0.2	889 906	4	3
Triangle	[276; 324]	0.2	898 644	4	2
Voisin	300	0.2	902 445	4	3
Voisin	[276; 324]	0.2	919 267	3	2
Interaction	300	0.2	937 562	3	2
Interaction	[276; 324]	0.2	911 957	3	2

Tableau 24: Comparaison aux modèles théoriques (modèle géo-histoire) (Population initiale de 300 et taux de migration de 0.2%)

L'homogénéité ou l'hétérogénéité des populations initiales n'est pas déterminante. Simuler avec un taux de migration réduit permet d'obtenir des hiérarchies moins marquées, qui s'écartent de la distribution théorique rang-taille du fait que l'écart entre le sommet et la base de la hiérarchie est moins marqué qu'il ne devrait l'être.

Il semble qu'il soit nécessaire que le système de villes connaisse et permette un flux migratoire conséquent afin de se structurer hiérarchiquement selon une loi rang-taille.

Ces trois nouveaux réseaux ont été créés à partir de la localisation de villes qui correspond à une réalité territoriale. Leurs caractéristiques ne sont pas aussi standardisées et marquées que puissent l'être celles des réseaux théoriques créés afin d'illustrer une caractéristique topologique particulière. L'interaction n'est pas conditionnée selon les mêmes caractéristiques.

Si les distributions hiérarchiques simulées ne correspondent pas au modèle rang-taille théorique, il est toutefois pertinent d'étudier comment et où la population se localise. S'il existe une hiérarchie urbaine, c'est qu'il y a une inégalité de peuplement qui se traduit par une réalité spatiale. Il est alors désormais nécessaire de savoir comment se répartit spatialement la population simulée.

### 2.4.3 Une répartition spatiale vraisemblable

Un travail de cartographie a été mené pour étudier la répartition spatiale des villes. Ce travail n'a concerné que les simulations avec une population homogène initiale des villes de 300 habitants et un taux de croissance de migration de 0.2%.

L'étude des cartes qui résulte des simulations permet de constater qu'il n'y a pas de concentration des villes selon leur taille. Aucun des trois réseaux modélisés n'entraîne un regroupement des principales villes.

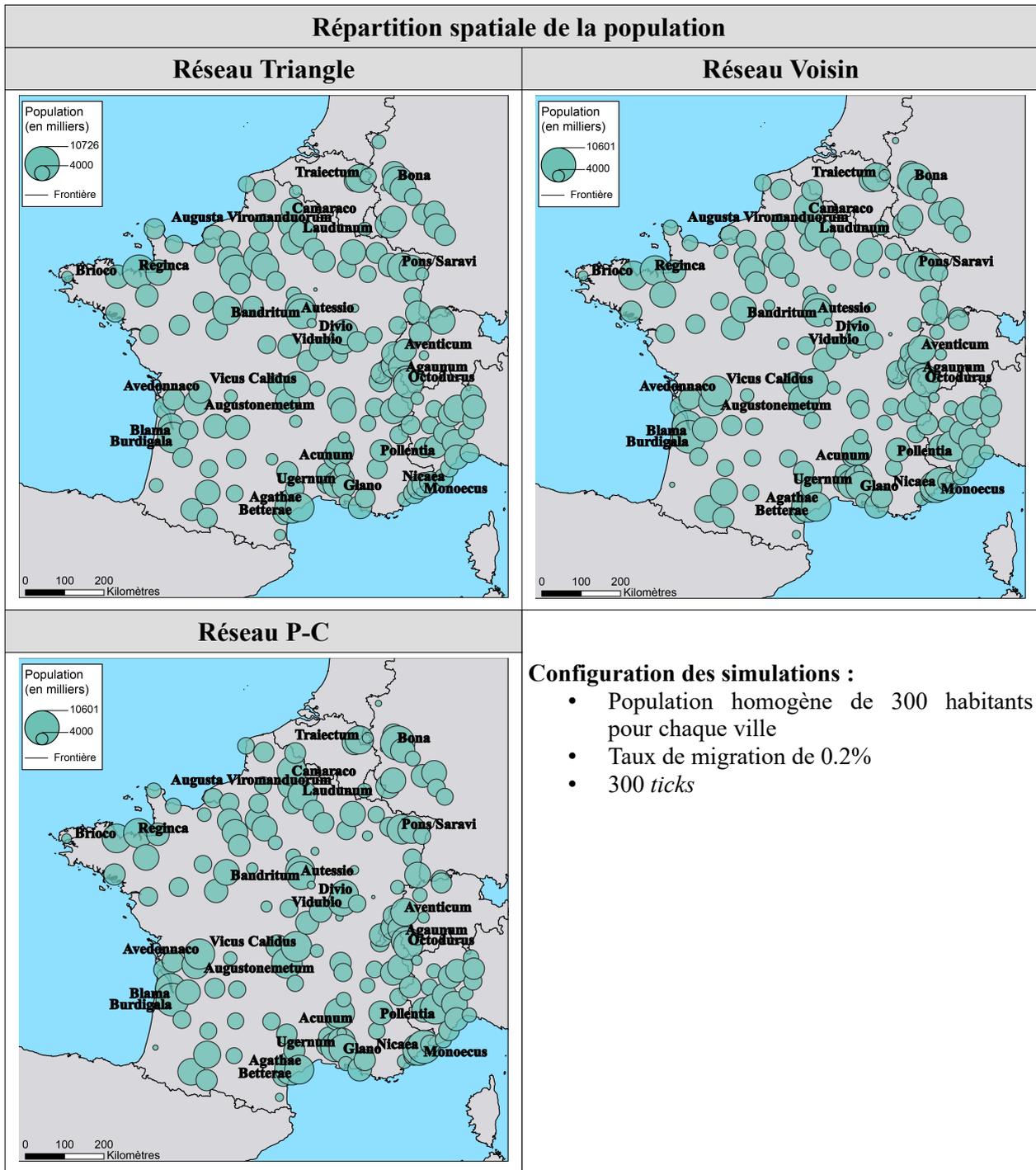


Figure 39: Résultats cartographiques de la répartition spatiale de la population (modèles géo-histoire)

Pour chaque réseau théorique construit, nous avons classé les villes en quartile selon leur population finale simulée. Ensuite, nous avons calculé la distance moyenne entre villes pour chaque quartile. L'objectif de ce traitement est d'étudier s'il existe une concentration spatiale des villes selon leur classe, afin de savoir si toutes les grandes villes ou petites villes sont les unes à côté des autres. Si les distances moyennes sont relativement identiques, c'est qu'il y a une répartition homogène des villes d'un même quartile dans l'espace et vice versa.

L'étude des différentes distances moyennes par quartile et par réseau théorique construit (cf. Tableau 25) permet de confirmer les résultats cartographiques précédents. Il existe une bonne répartition spatiale des villes selon leur population. Les plus grandes villes ne sont pas groupées spatialement entre elles, idem pour les plus petites villes.

	Réseau Voisin	Réseau P-C	Réseau Triangle
Quartile 1	442 761	449 554	444 796
Quartile 2	467 856	437 315	447 520
Quartile 3	446 812	457 371	429 531
Quartile 4	414 191	444 922	465 928

Tableau 25: Distances moyennes entre villes du même quartile pour les réseaux théoriques construit (en mètres)

L'intérêt de ces simulations n'est pas de retrouver la taille actuelle des villes, car de nombreux facteurs historiques ou économiques ne sont pas pris en compte. Néanmoins, ces simulations ont permis d'appréhender le rôle des réseaux de transport sur la structuration statistique et spatiale hiérarchique des systèmes de villes.

Sur les 41 villes du 4e quartile (les 41 plus grandes villes), nous avons étudié le profil de leurs 6 plus proches voisines. Selon le quartile d'appartenance de ces voisines, nous pourrions savoir si nous sommes dans une logique christallérienne (Christaller, 1933), selon laquelle le territoire est organisé de façon multiscale autour des plus grandes villes. Les villes de faible rang (le 1er quartile composé des villes de plus petites tailles) sont à proximité des plus grandes villes. Les villes de rang intermédiaire se trouvent globalement et schématiquement au double de distance des villes de rang inférieur.

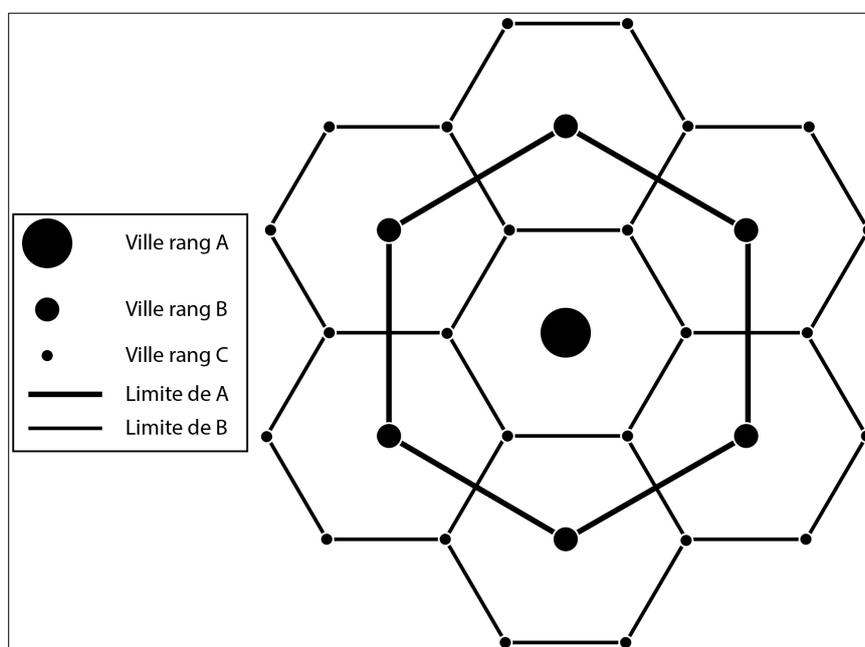


Figure 40: Simplification spatiale du modèle de Christaller (Christaller, 1933)

Nous étudions alors les 6 villes les plus proches des villes du 4<sup>e</sup> quartile (les 41 plus grandes villes) des simulations. Le nombre total des villes à étudier est de 246 (41 \* 6).

La répartition spatiale ne correspond pas strictement à une logique christalérienne, car les plus proches voisines ne sont pas toutes des villes du 1er quartile. Cependant, la logique semble globalement respectée puisque les villes du 1er quartile sont nombreuses dans le voisinage des plus grandes villes, et les villes du dernier quartile sont toujours les moins nombreuses. Plus les villes sont petites, plus elles sont à proximité des grandes villes.

	Réseau Voisin	Réseau P-C	Réseau Triangle
Quartile 1	67	65	69
Quartile 2	64	59	62
Quartile 3	61	68	61
Quartile 4	54	54	54

Tableau 26: Total de villes par quartile présentes dans l'ensemble du voisinage des villes du Quartile 4

Ces simulations qui ont reposé sur des données empiriques, notamment à partir de la localisation de villes en l'an 300, ont montré que le modèle ne donne pas des résultats aberrants. Les distributions hiérarchiques et la répartition spatiale de la population sont crédibles, mais ne correspondent pas pour autant à des distributions de type rang-taille. La diminution des taux de migration a eu pour conséquences de nuancer l'inégalité de la croissance entre les villes. De fait, les hiérarchies s'écartent des distributions de type rang-taille. Il semble qu'il faille garder des taux de migration relativement conséquents, car la population des plus grandes villes s'explique par leur capacité à capter les flux migratoires. **Plus le taux de migration est élevé, plus l'inégalité de peuplement l'est aussi.**

À quoi est due une distribution rang-taille ? De nombreux paramètres ne sont pas intégrés comme les accidents historiques et l'hétérogénéité de l'espace qui entraînent une spécialisation de la production des villes ou encore le rôle de l'innovation (Pumain, 1997 ; 2010 ; 2012b ; Pumain, Saint-Julien, 2010). L'objectif a été de comprendre et reproduire le plus simplement possible la hiérarchie des systèmes de villes à partir de foyers de peuplement de taille identique et de règle d'interaction volontairement simpliste. À partir des bases du modèle créé, il est alors possible d'implémenter de nouveaux paramètres pour influencer et ajuster les courbes hiérarchiques, et la répartition de la population simulée.

## 2.5 Conclusion

Méthodologiquement, pour comprendre l'émergence et la croissance allométrique des systèmes de villes, il est possible soit de faire de la rétrospective (observer dans le temps long comment ont évolué les villes avec, comme très grande limite, la question de l'existence des données adéquates), soit de recourir à la simulation. C'est l'option qui a été retenue dans ce travail, qui a visé à élaborer un modèle de simulation pour mieux comprendre la hiérarchisation des systèmes de villes et, plus spécifiquement, le rôle des réseaux de transport sur cette hiérarchisation. Ce modèle a été voulu le plus simple possible, en se basant seulement sur différentes formalisations des interactions entre villes. L'objectif était donc de voir si les distributions statistiques observées des villes (loi rang-taille) pouvaient être reproduites en simulant seulement des échanges entre villes régit par différents types de règles, elles-mêmes très simples.

**Les résultats montrent qu'une hiérarchie urbaine émerge dès lors que les villes du système interagissent.** La différence de croissance, et donc de taille des villes, est le fruit de soldes

migratoires inégaux. Ce qui diffère cependant, c'est la structure de la hiérarchie. Les simulations dans lesquelles l'espace ne rentre pas en compte ont permis de montrer que même l'interaction aléatoire entraîne une hiérarchisation du système, mais que celle-ci reste faible. À l'inverse, l'interaction selon la contribution de chaque ville aux interactions va entraîner une hiérarchie très marquée.

Cependant, l'espace et les réseaux de transport jouent un rôle indéniable dans le processus de la hiérarchisation des systèmes de villes, car ils n'offrent pas les mêmes potentiels d'interaction aux villes du système. Ils ont donc été intégrés dans une deuxième série de simulations. Chaque réseau « type » s'est avéré produire une structure hiérarchique plus ou moins marquée. Un système de villes avec un réseau de Manhattan va avoir une distribution hiérarchique peu marquée, tandis qu'un réseau Invariant d'échelle conditionne une distribution hiérarchique très marquée. ***Donc, la hiérarchie urbaine est liée à la structure du réseau de transport et à ses caractéristiques fonctionnelles telles que la vitesse.*** Notons toutefois que les résultats obtenus sont extrêmement dépendants de l'utilisation de réseaux de transport typés. Leur utilisation a permis de tester les conséquences de certains attributs topologiques et fonctionnels sur la hiérarchie urbaine, mais ils ne correspondent pas sous leur forme pure à des réalités empiriques.

Suite à ces premiers travaux exploratoires, nous avons cherché à étudier la *path dependency* des hiérarchies urbaines. Les résultats montrent que les configurations sont plus ou moins modifiables, avec une inertie plus ou moins forte du système qui dépend notamment des caractéristiques du réseau de transport. La logique du réseau est ce qui prime pour la *path dependency*. Aussi, en modifiant le réseau de transport, il devrait être possible de modifier une tendance en cours de hiérarchisation. Or, il apparaît qu'il n'en est rien. Seule une intervention peu crédible peut y parvenir au détriment de l'efficacité territoriale. Citons par exemple le fait de connecter les plus petites villes entre elles par l'intermédiaire d'un réseau efficace en détériorant les connexions des plus grandes villes, moteurs économiques des systèmes de villes.

Dans une optique de politique d'aménagement du territoire, il semble qu'avoir un réel impact sur la hiérarchie soit particulièrement difficile. Cependant, des actions d'aménagement localisées peuvent avoir de bonnes répercussions pour soutenir la croissance de quelques villes.

Les résultats montrent que si les modèles permettent bien de faire émerger des hiérarchies dans les systèmes de villes, ils ne permettent en revanche pas, ou très mal, de reproduire des distributions de type rang-taille. Se baser uniquement sur différentes formalisations théoriques des échanges pour reproduire les distributions théoriques (qui, rappelons-le à nouveau, diffèrent parfois beaucoup des distributions observées) n'apparaît donc pas suffisant. D'autres phénomènes, comme l'émergence, la diffusion des innovations et leurs impacts économiques, sont donc obligatoirement à prendre en compte (Pumain, 1997).

Enfin, l'utilisation de données empiriques de semis de villes a permis de reproduire des répartitions spatiales de la population crédibles, en évitant par exemple la concentration des grandes villes entre elles et en répartissant la population de sorte qu'on retrouve une logique des villes moteurs et d'arrière-pays. Mais ces données empiriques ne nous auront toujours pas permis d'obtenir des distributions hiérarchiques selon une distribution rang-taille.

Ces simulations à partir d'un semis de villes historiques ont aussi mis en avant le fait que le taux de migration doit être suffisamment important pour obtenir des distributions hiérarchisées se rapprochant de la loi rang-taille. Quand on diminue le taux de migration, la hiérarchie est en effet moins marquée. Donc, si on restreint ces flux migratoires, en proposant par exemple une offre d'emploi, de travail et d'éducation jugée acceptable sur le lieu de vie, l'inégalité de peuplement sera moindre. Or, aujourd'hui ce sont les villes les plus grosses qui concentrent ces attributs.

Si l'écart avec la distribution des villes actuelles est marquant, il faut garder en tête que le système de villes actuel est composé de plus de villes et d'un réseau routier bien plus complexe qu'en l'an 300 date du semis de villes utilisé. De nouvelles villes ont émergé et le réseau de transport a évolué en conséquence : c'est sur ce nouveau point que nous allons à présent travailler, à savoir l'impact de l'émergence de nouvelles villes et de l'évolution conjointe du réseau de transport sur la structure hiérarchique des systèmes de villes.

### 3 Contribution à la compréhension de l'émergence des villes et de ses conséquences statistiques et spatiales sur le système de villes

L'étude de la croissance allométrique des systèmes de villes pour différents types d'interactions spatiales a permis de montrer l'importance de la logique des interactions sur la configuration des systèmes de villes (échanges aléatoires vs échanges au temps  $t$  conditionnés par l'intensité de la participation aux échanges avant  $t$ ). Elle a aussi montré l'impact déterminant des réseaux de transport (de leur topologie et, dans une moindre mesure, de leurs fonctionnalités, qui introduisent une forte différenciation spatiale dans la répartition des intermédiarités, des centralités et des accessibilités des villes ) sur la capacité des villes à capter les flux et in fine à croître.

Si ces simulations ont pu produire des systèmes de villes hiérarchisés, il s'est avéré en revanche que la simplicité volontaire des modèles utilisés n'a pas permis de reproduire des systèmes hiérarchisés de type rang-taille. La logique des interactions et la structure des réseaux, qui conditionnent l'hétérogénéité spatiale des potentiels d'interaction, ne suffisent donc pas – et c'est en un sens heureux pour la science géographique, et les Sciences Humaines et Sociales en général – à reproduire et expliquer les configurations observées des systèmes de villes. Dans les configurations empiriques des systèmes de villes, on peut ainsi très raisonnablement penser, voire affirmer en s'appuyant sur les travaux existants, que la Géographie compte (une simple approche statistique à la Gibrat ne suffit pas (Gibrat, 1931), notamment pour comprendre les répartitions spatiales des villes), que l'Histoire compte (les accidents historiques, les régimes politiques (centralisation vs décentralisation) influencent localement, mais aussi globalement les systèmes de villes, et que l'Économie compte, en particulier ce qui a trait à l'innovation et à sa diffusion qui vont conditionner qui va croître, à quelle vitesse et combien de temps.

Pour autant, si les simulations réalisées n'ont pas permis de produire *stricto sensu* des réseaux de villes de type rang-taille, elles ont néanmoins abouti à produire des réseaux de villes aux configurations statistiques et spatiales « crédibles », en particulier quand les simulations ont mobilisé des données historiques. Deux choix étaient alors possibles. Le premier consistait à abandonner l'approche KISS pour chercher à intégrer à nos modèles des considérations historiques et/ou économiques ou d'autres problématiques géographiques (contraintes spatiales liées à l'accès aux ressources par exemple), et voir si cette complexification des modèles permettait de se rapprocher davantage des réseaux empiriques. Ce choix n'a pas été effectué, car il ne correspondait pas à notre positionnement initial et aurait *in fine* conduit à converger vers des modèles proches des modèles existants, notamment ceux de la famille Simpop (Pumain, 2012a).

Restant sur notre volonté de produire des modèles simples, avec peu d'hypothèses, où la nature des interactions jouerait le rôle central, et restant sur notre démarche « pas à pas », une dernière partie de notre travail a donc consisté, non pas à intégrer l'Histoire ou l'Économie dans nos simulations, mais à s'intéresser à l'émergence des villes et aux processus de coévolution système de villes-système de transport, jusque-là non pris en compte. En effet, dans notre modèle, comme dans presque tous les modèles existants, les simulations de croissance allométrique des systèmes de villes ont comme point de départ un semis de villes donné, qui n'évolue pas au cours du temps. Or, l'observation des systèmes de villes sur le temps long montre que ces systèmes se densifient, qu'ils comptent de plus en plus de villes (plus rarement, certaines disparaissent), et que les réseaux les connectant évoluent eux aussi conjointement. L'idée est de rester sur la

logique de simulation KISS mobilisée jusqu'ici, et de chercher à savoir où des villes sont susceptibles d'émerger, comment les connexions entre les villes via les réseaux de transport évoluent, pour *in fine* voir l'influence de ces évolutions sur les configurations finales des systèmes de villes. Dit autrement, pour comprendre le système de villes, il ne suffit pas de voir comment il évolue et se hiérarchise dans le temps selon différentes logiques d'interaction. Il est important de considérer l'émergence de nouveaux éléments, car ni le système de villes, ni les réseaux les connectant ne sont fixes. Le réseau de transport change au fil du temps pour relier les nouvelles villes, mais aussi afin de s'adapter aux innovations des modes de transport et aux besoins sociétaux. Si nous étudions le système des villes françaises dans les années 100, il n'est absolument pas constitué du même nombre de villes qu'actuellement et le réseau de transport est routes romaines. Ces caractéristiques morphofonctionnelles ont varié drastiquement.

Pour comprendre comment s'organise et se structure un système de villes dans le temps long, il faut donc comprendre les logiques d'émergence de ces nouvelles villes : où émergent-elles et selon quelle logique ? Or, cette question de l'émergence de villes au sein d'un système déjà établi et structuré est peu traitée, sauf pour comprendre l'émergence de la notion d'agglomération elle-même, comme peut le faire le modèle Sugarscape (Epstein, Axtell, 1996).

L'ambition de cette partie de la thèse est donc de contribuer à l'étude de l'émergence des villes en dehors des déterminants classiques que sont les attributs dits de première nature : présence d'eau, sols fertiles, situation d'interface, etc. La question est de comprendre les logiques spatiales d'émergence de nouvelles villes dans un système donné et d'en mesurer l'effet sur l'évolution du système de villes dans son entièreté dans le temps long.

Jusqu'à présent, le travail de modélisation et de simulation a reproduit l'interaction entre les villes via des migrations résidentielles « définitives ». Toutefois, parallèlement à ces migrations définitives, l'interaction entre villes se traduit aussi par des migrations « temporaires ». Ces migrations (déplacements) représentent l'interaction économique (échanges de biens, de services et d'informations) entre les villes du système. Ces interactions spatiales entre les villes sont le résultat de l'hétérogénéité du territoire, des spécialisations. En effet, les villes ne possèdent pas les mêmes attributs et la même histoire. Elles ont développé certaines techniques, ont pu acquérir certains savoirs dont ne disposent pas, ou pas au même moment, les autres agglomérations. Il y a alors une complémentarité-concurrence de profil entre les villes. Pour bénéficier des biens et services dont elles ne disposent pas, les villes ont tout intérêt à échanger afin de satisfaire les demandes locales de leur population portant sur des produits ou services manquants. Ainsi, au sein de chaque système de villes, il existe des relations de concurrence et de complémentarité qui vont générer l'interaction. Elle est donc le fruit de l'hétérogénéité spatiale.

Lors de ces déplacements temporaires, les individus en mouvement se rencontrent et peuvent réaliser des échanges (de biens, services, ou informations). Pour simuler l'émergence des villes, ce sont ces interactions se déroulant en dehors des villes que nous allons chercher à modéliser. ***L'hypothèse posée est qu'une ville va émerger là où de nombreux individus se rencontrent et se sont rencontrés et où ils ont effectué des interactions fructueuses, c'est-à-dire qu'ils ont pu échanger avec les autres sans que les conditions de cet échange ne leur coûtent beaucoup (en minimisant leur coût de déplacement). Les individus vont alors juger cette localisation comme propice et, à terme, s'y installer durablement.***

Ainsi, l'ambition du modèle est de simuler l'émergence de nouvelles villes au sein d'un système de villes déjà existant en observant, en fonction de paramètres liés aux réseaux de transport notamment, où sont localisées les concentrations spatio-temporelles d'échanges fructueux. Nous ne tentons donc pas de créer une théorie de l'émergence des villes, mais plus simplement d'alimenter la réflexion sur l'impact des interactions au sein des systèmes de villes sur les

logiques de localisations de nouvelles villes et, *in fine*, sur la compréhension de l'évolution globale du système de villes.

Dans un premier temps, la logique du modèle sera présentée. Sa réalisation technique et son algorithme seront détaillés en faisant un focus sur les nouveautés qu'apporte ce modèle par rapport aux modèles précédents. Le plan d'expérience aura pour objectif la recherche des paramètres déterminants et explicatifs des logiques spatio-temporelles de l'émergence de nouvelles villes (topologie de réseau, coévolution de réseau de transport, mode d'interaction entre agents, etc.). Enfin, une calibration du modèle à partir de données empiriques sera utilisée pour apprécier la crédibilité des résultats.

### **3.1 Les concentrations spatio-temporelles d'échanges fructueux entre des individus en mouvement comme lieu d'émergence des villes**

Les échanges entre les villes sont nécessaires, car les biens, les services, les savoirs et les compétences sont variables d'une ville à l'autre. Ces échanges sont réalisés par des individus qui se déplacent temporairement pour interagir avec les individus d'autres villes. Les individus qui interagissent sont motivés par la nécessité d'obtenir certains biens, services ou informations des autres villes pour leur satisfaction personnelle, ou pour en tirer du profit de retour dans leur ville d'origine. L'interaction n'est donc pas altruiste. Elle répond à une logique de profit économique. Or, se déplacer représente un coût (énergétique, financier, temporel, etc.) qui va avoir un impact sur le profit final. Il est donc dans l'intérêt des individus que l'échange souhaité se produise le plus proche de leur lieu de vie ou d'activité pour en diminuer les coûts. Mais si l'ensemble des individus optent pour une telle stratégie, la conséquence sera de ramener les interactions commerciales au point mort, étant donné qu'aucun individu ne voudra se déplacer hors de sa propre ville. Si chaque individu cherche à échanger chez lui, pour minimiser au maximum ses coûts de transaction, alors il n'y aura au final plus d'interactions.

Des interactions ayant effectivement lieu, on peut faire l'hypothèse qu'une situation d'équilibre spatial (Fournier, Scarsini, 2019) émerge concernant la localisation des échanges, sans pour autant qu'une concertation préalable ait lieu. En effet, l'Homme a un comportement contingent (Schelling, 2007), c'est-à-dire, que ses choix dépendent de ce que les autres font. Bien que ses décisions aient pour but de contribuer à son bien-être personnel, il doit prendre en compte celles des autres. Nous sommes alors dans le cas où chaque action est déterminée par celle des autres individus. Ainsi, l'interaction entre les villes se produit, car les individus qui y participent y trouvent un intérêt sans qu'aucun ne semble lésé. Cette situation d'équilibre se traduit par des zones d'échanges où les coûts d'interaction vont s'équilibrer entre les individus des différentes villes. Aucun groupe d'individus, défini selon leur ville d'appartenance, ne se trouve réellement perdant lors des déplacements, car tous jugent le coût dépensé « juste » par rapport à celui dépensé par les autres pour que l'interaction puisse effectivement se produire.

Notre hypothèse est que de nouvelles villes émergent là où ont lieu de fortes concentrations spatio-temporelles d'interactions fructueuses entre des individus en mouvement, c'est-à-dire, là où de nombreux individus vont consentir à se rendre pour échanger sans pour cela supporter un coût de déplacement individuel trop important. On retrouve ici le principe du moindre effort (Zipf, 1949 ; Tannier, 2017) primordial dans l'émergence des configurations spatiales.

La localisation de ces nouvelles villes peut leur conférer à plus ou moins long terme un rôle clé pour l'interaction globale dans le système de villes. Elles peuvent donc impacter la distribution statistique et spatiale de l'ensemble du système de villes.

Sur la base de cette hypothèse, la question qui se pose est de savoir comment localiser ces zones de concentration d'échanges profitables, et donc d'émergence future des villes ?

Les systèmes urbains étudiés étant des systèmes complexes dans lesquels les décisions d'un individu dépendent de celles prises par les autres, nous recourons comme précédemment à la modélisation Multi-Agents. Le modèle permet de simuler l'interaction au sein d'un système composé de trente villes connectées par un réseau de transport déjà établi, dont la topologie et les caractéristiques vont varier selon les simulations. Ce nombre de villes initiales est choisi de manière arbitraire, mais avec la volonté de représenter un système de villes naissant composé de seulement quelques villes se mettant en interaction. L'interaction se fait par l'intermédiaire d'agents qui vont rencontrer d'autres agents lorsqu'ils se déplacent à destination d'autres villes afin d'interagir. Les agents, en cherchant à faire le maximum de profit, vont apprendre de leurs interactions antérieures afin de minimiser leur coût d'interaction, ce qui va avoir des répercussions sur la localisation des échanges. Certains lieux vont alors devenir des zones de concentration de l'interaction et vont pouvoir devenir des villes.

Le modèle comprend donc plusieurs étapes. Il s'agit d'abord de savoir comment définir et repérer les zones de concentration des échanges fructueux. Puis, de définir un seuil pour cette concentration au-delà duquel on estime qu'une nouvelle ville va se créer. Enfin, après l'émergence d'une ville, le modèle va prendre en compte l'évolution du réseau de transport qui se fait en conséquence de l'émergence d'une nouvelle ville. En effet, ces nouvelles villes vont émerger sur les tronçons du réseau initial sur lesquels l'interaction se produit concrètement. Mais une fois une nouvelle ville créée, on peut supposer qu'elle va chercher à tisser des relations plus directes avec les autres villes situées dans un entourage plus ou moins lointain en se connectant via de nouveaux arcs de réseau à ces villes. Dans ce modèle, le réseau de transport peut donc coévoluer en même temps que le système de villes, comme dans Baptiste (Baptiste, 1999) et Raimbault (Raimbault, 2018). ***L'émergence de nouvelles villes entraîne alors une modification de la structure du réseau et redistribue les potentiels d'interaction.***

Prendre en compte l'émergence des villes et la coévolution système de transport-système de villes vise, tout en gardant les grandes logiques du modèle initial qui ne s'intéresse « qu'à » la nature des interactions et ses effets sur les systèmes de villes, à voir dans quelle mesure cette prise en compte influence les configurations statistiques et spatiales des systèmes obtenus, et plus spécifiquement s'ils tendent à se rapprocher, ou pas, de systèmes rang-taille.

Après avoir présenté les principes du modèle « Émergence », le paragraphe suivant en détaille le fonctionnement.

### **3.2 Présentation du modèle « Émergence »**

Afin de tester la crédibilité de l'hypothèse selon laquelle l'émergence d'une nouvelle ville au sein du système de villes est la conséquence de concentrations spatio-temporelles d'échanges fructueux entre des individus en mouvement, nous avons eu recours à une nouvelle modélisation Multi-Agents. Ce modèle a pour objectif de simuler l'interaction entre des individus qui vont se déplacer sur des réseaux de transport et interagir en dehors des villes. Tout comme pour les modèles précédents, il est essentiel de faire varier les paramètres et conditions de l'interaction (topologie du réseau, mode d'interaction entre les agents, etc.) pour en évaluer les impacts sur l'émergence de nouvelles villes et, *in fine*, sur le système urbain dans sa totalité. Les nouveautés de ce modèle résident dans la possibilité de faire émerger de nouvelles villes et de faire évoluer en conséquence le réseau de transport.

### 3.2.1 Fonctionnement général du modèle « Émergence »

Les bases du modèle utilisé restent les mêmes que précédemment, mais s'ajoutent deux nouveaux types d'entités : les « agents Marchands » et les « ressources Lieux ».

Le système de villes modélisé est donc composé :

- Des villes qui sont elles-mêmes composées d'individus. Parmi ces individus, une partie va être des « Marchands », c'est-à-dire, des agents réalisant l'interaction en quittant temporairement leur ville  $i$  dans l'espoir d'échanger avec des individus de la ville  $j$ . Comme pour les autres modèles, mis à part les « Marchands » il y a aussi des Migrants qui, à la fin de chaque pas de temps simulé, vont migrer définitivement vers d'autres villes, en fonction de leur attractivité, qui est définie par leur contribution aux échanges préalables et par leur proximité en distance réseau. Les Migrants représentent un pourcentage fixe de la population de chaque ville à un temps  $t$ . Ils sont représentés par un stock.
- Les interactions entre Marchands se réalisent sur une nouvelle entité : les ressources actives « Lieux » qui ont chacune un identifiant. Les ressources actives « sont des ressources qui possèdent une certaine autonomie vis-à-vis du système auquel elles appartiennent, c'est-à-dire, que leur état peut évoluer indépendamment des autres entités qui composent le système » (Grimaud, 1996) cité dans Galland (Galland, 2001). Ces Lieux correspondent à une segmentation des arcs du réseau de transport en unités élémentaires, qui correspondent à la distance moyenne pouvant être parcourue quotidiennement par un individu à pied lorsqu'il transporte des marchandises sur une longue distance. C'est donc cette distance moyenne qui constitue l'unité de mesure des arcs. En cours de simulation, chaque Lieu va mémoriser le nombre d'interactions qui se sont produites en son sein. Puis, à partir d'un certain nombre d'interactions, défini en amont, un lieu va devenir une nouvelle ville. Souhaitant étudier l'émergence des villes dans le temps long, nous avons utilisé la marche comme mode de transport, pour segmenter les arcs en ressources Lieux, car il était le mode le plus répandu à l'origine des systèmes urbains. Concrètement, on divise donc les arcs, dont les longueurs sont en kilomètres, en Lieux, en posant qu'un Lieu est égal à 30 km. Trente kilomètres correspondant à la distance moyenne qu'un individu transportant des charges peut parcourir à pied en une journée. Pour la période du XIII<sup>e</sup> au XVIII<sup>e</sup> siècle, la vitesse pour un simple voyageur est de 3 ou 4 km (Renouard, 1962) puis, les distances parcourues en une journée pour le transport de marchandises sont d'une trentaine de kilomètres (5 à 10 km sur de forts reliefs et à la remontée des fleuves) (Renouard 1962, Bautier 1960, Trénard 1959) cités dans le travail de Bretagnolle (Bretagnolle, 2009). Vidal de la Blache (Vidal de la Blache, 1911) explique l'espacement des villes selon les déplacements. Leur espacement correspond à la distance aller-retour qu'on peut franchir en une journée, qui est comprise en 30 et 50 km. On choisit de garder la valeur la plus faible afin de prendre en compte la possible difficulté, liée au relief, de se déplacer rapidement. Le nombre de Lieux par arc est alors le résultat de l'arrondi de :  $\text{longueur en kilomètres} / 30$ . Pour parcourir 300 km il faudra donc 10 jours.

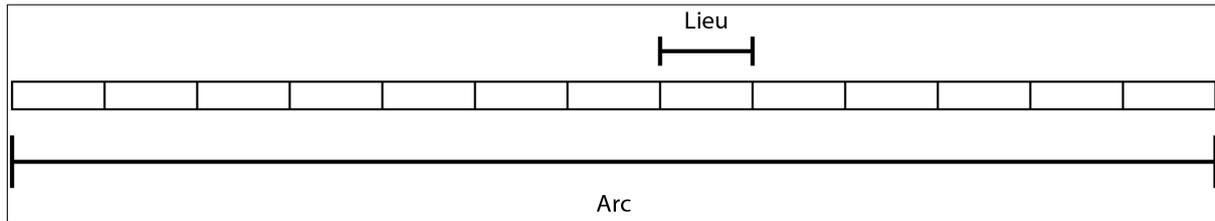


Figure 41: Segmentation d'un Arc en Lieux

Les réseaux de transport utilisés sont, comme précédemment, des réseaux « types » théoriques. Ils ont été construits avec le logiciel *R* pour être ensuite « projetés » sous SIG afin d'en calculer la longueur des arcs en kilomètres. Ils ont été calibrés de façon à obtenir des distances réseau correspondant à l'échelle nationale française.

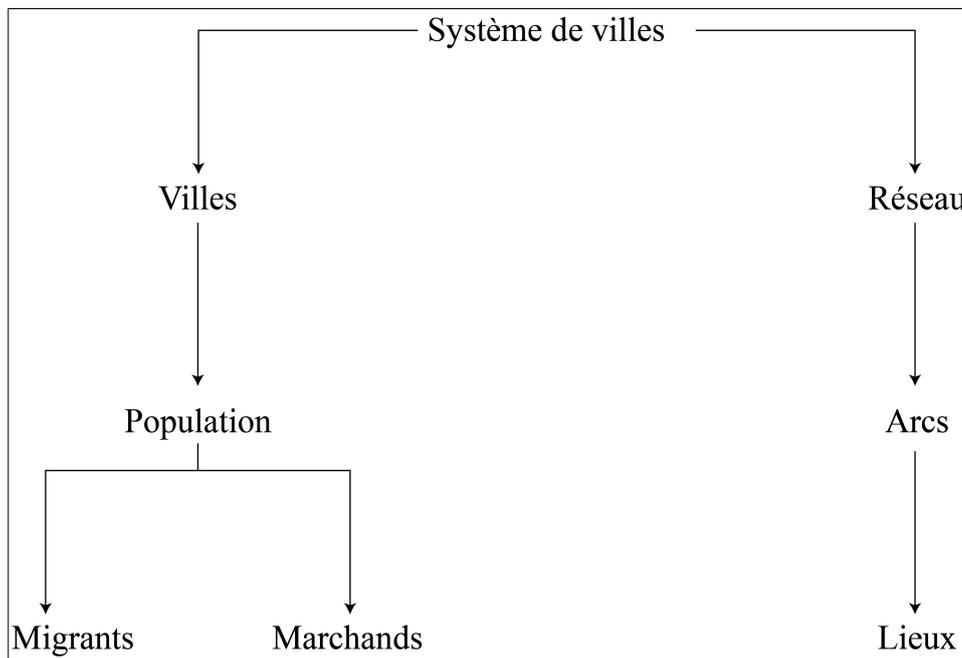


Figure 42: Décomposition du modèle "Émergence"

L'agent Marchand, individu d'une ville  $i$  qui se rend temporairement en  $j$ , et la ressource Lieu, segmentation des arcs où va se produire l'interaction, sont les éléments essentiels du modèle. L'algorithme de simulation repose sur leurs relations Marchand-Lieu (agent-environnement), et sur les interactions, Marchand-Marchand (agent-agent).

Le modèle « Émergence » reprend les mêmes mécanismes que ceux décrits précédemment en simulant les flux résidentiels entre chaque ville. Ces flux résidentiels sont effectués par les Migrants (représentés par un pourcentage fixe de la population de chaque ville au temps  $t$ ). Le taux de migration est défini avant chaque simulation. Il sert à calculer la quantité de population de chaque ville qui va migrer. La migration est « individuelle », car chaque « migrant » choisit sa destination, comme précédemment, en fonction d'un modèle de type gravitaire qui intègre les choix faits par les autres individus.

L'attractivité  $A_j$  de la ville  $j$  sur un individu de la ville  $i$  est donnée par :

$$A_j = F_j / D_{ji}$$

avec  $F_j = (n_j / N)$  où :

-  $N$  le nombre d'échanges migratoires définitifs entre toutes les villes du système depuis le début de la simulation,

-  $n_j$  le nombre d'échanges migratoires définitifs (émis et reçus) concernant la ville  $j$ ,

$F_j$  correspond donc à la contribution relative de la ville  $j$  au total des migrations définitives ayant eu lieu depuis le début de la simulation.

$D_{ij}$  est la distance réseau en « Lieu » entre  $i$  et  $j$ .

La ville de destination pour un Migrant de la ville  $i$  est celle qui maximise  $A_i$ .

Comme mentionné précédemment, la différence essentielle de ce modèle est qu'il traite des déplacements temporaires des individus, appelé les Marchands, qui vont d'une ville  $i$  à  $j$  avec l'intention de revenir en  $i$  après avoir échangé (à tout le moins pendant un moment avant de prendre, le cas échéant, la décision de fonder une nouvelle ville).

Ces nouveaux agents Marchands se rencontrent et échangent sur les arcs du réseau (en des Lieux) et non plus uniquement dans les villes. Ils ont comme objectif de maximiser leur profit en échangeant le plus possible sans pour autant supporter d'importants coûts de transport grâce à un mécanisme d'apprentissage.

Ainsi, chaque ville  $i$  au moment de sa création compte un certain nombre d'habitants. Puis, à chaque pas de simulation, la population de la ville  $i$  évolue en fonction de sa croissance naturelle et de son solde migratoire (arrivées de migrants - départs de migrants).

Le nombre de Marchands est recalculé chaque année simulée, qui est un pas de simulation, et est égal à 1% de la population de la ville.

$$\text{Nombre de nouveaux Marchands pour la Ville } i = ((\text{Pop}(i)) * 1 / 100)$$

Chaque agent Marchand a pour objectif d'échanger en faisant le maximum de profit. Le profit pour un Marchand d'une ville  $i$  qui échange en un Lieu  $j$  est fonction de deux paramètres :

- le nombre de Marchands avec qui il a échangé en  $j$ . Dans cette version du modèle, il suffira d'avoir échangé pour faire un gain, c'est-à-dire rencontrer un ou plusieurs autres Marchands. Toutefois, on pourrait imaginer d'autres principes comme un profit à l'échange en fonction d'une probabilité donnée ou du type d'agents rencontrés (par exemple, l'échange pourrait être considéré comme plus fructueux s'il se fait avec un Marchand venant de loin, etc.).

- la distance  $D_{ij}$ , en distance Lieux, parcourue par le Marchand depuis sa ville d'Origine pour permettre l'échange. Cette distance  $D_{ij}$  est ensuite rapportée est multiplié par la constante  $Cte(dist)$  qui est le prix par Lieu parcouru. Ici la constante  $Cte(dist)$  vaut 1, mais pourra être modifiée afin de tester de nouvelle hypothèse. Ainsi, le fait de se déplacer d'un Lieu coûte 1 aux Marchands.

Le profit monétaire pour un Marchand  $M_i$  qui échange en un Lieu  $j$  est donné par :

$$\text{Profit } M_i \text{ en } j = (Cte_{\text{gain}} * \text{nombre de partenaires rencontrés en } j) - (D_{ij} * Cte_{\text{dist}})$$

La constante  $Cte(gain)$  est calibrée au regard des distances  $D_{ij}$  de façon à ce que le profit soit toujours positif lorsqu'au moins un Marchand a été rencontré. Ici, la constante  $Cte(gain)$  vaut 40 et représente l'argent gagné à chaque interaction avec un autre Marchand. Comme la distance moyenne (en Lieux) entre deux villes pour le système étudié est de 14, cela signifie que le profit dépend à la fois du nombre d'interactions et de la distance parcourue, puisque les deux paramètres sont dans le même ordre de grandeur.

La distance entre  $i$  et  $j$  représente donc un coût qui limite le profit du Marchand. Comme il cherche à maximiser son profit, il va chercher à échanger au plus près de chez lui. S'il ne rencontre aucun Marchand, il subit donc une perte puisqu'il y a eu dépense de transport, mais pas de profit.

Les agents Marchands ont plusieurs propriétés et caractéristiques qui leur permettent d'optimiser leurs interactions. Chaque Marchand possède à tout moment de la simulation :

- un identifiant,
- une Origine afin d'identifier les Marchands d'une même ville,
- une Destination vers laquelle se déplacer et qu'il choisit avant chaque déplacement en vue d'interagir,
- une vitesse fixée ici à 30 kilomètres par jour, mais qui peut varier (par exemple pour simuler des modes de transport plus rapide),
- un d-min : « distance » minimale pour chaque Destination. Il s'agit de l'identifiant du « Lieu » de l'échange le plus rentable effectué depuis le début de la simulation pour une Destination donnée. L'identifiant d'un lieu étant unique, il permet donc de calculer à quelle distance de la ville d'Origine du Marchand l'interaction a eu lieu. Par défaut, en début de simulation, le d-min correspond à la localisation de la Destination,
- un d-max (« distance » maximale) pour chaque Destination : l'identifiant du « Lieu » de l'échange ayant entraîné le plus petit profit pour une Destination. Par défaut, en début de simulation, le d-max correspond à la localisation de la Destination,
- le profit obtenu lors de l'échange pour une Destination donnée (cette valeur est calculée au moment de l'échange et il la conserve jusqu'à son retour dans sa ville d'Origine). La valeur est réinitialisée à zéro à chaque nouveau départ,
- un profit maximum pour une Destination donnée, qui correspond au montant maximal du profit réalisé lors d'une interaction depuis le début d'une simulation. Ainsi, si au temps  $t$  le profit réalisé pour une ville  $j$  est le profit maximum réalisé jusqu'alors, la valeur du profit pour  $j$  est affectée au profit maximum pour cette Destination,
- un profit total qui correspond à la somme des profits réalisés depuis le début de la simulation,
- un seuil de profit minimal à réaliser avant d'avoir l'autorisation de s'installer sur un « Lieux » profitable qui va devenir une Ville émergente,
- une distance acceptable. Quand un Marchand choisit une Destination, il se donne comme distance acceptable à parcourir soit le d-min, soit le d-max de la Destination, selon s'il a réussi ou pas à échanger à l'étape précédente.

Ces paramètres ont pour vocation de permettre aux Marchands d'adapter leurs déplacements afin d'obtenir des profits plus élevés par un mécanisme d'apprentissage. Ainsi, le modèle fonctionne comme suit : avant d'effectuer un déplacement, un agent Marchand doit choisir sa Destination. Le choix de la Destination est, comme pour les Migrants, fonction de l'attractivité des villes avec l'attractivité  $A_j$  de la Ville  $j$  pour un Marchand de la Ville  $i$  :

$$A_j = F_j / D_{ji}$$

La ville de Destination pour un un Marchand de la Ville  $i$  est celle qui maximise  $A_i$ .

Les Marchands ont la capacité d'apprendre en fonction de leurs interactions antérieures. Leurs déplacements vont évoluer et s'ajuster au cours du temps selon la réussite qu'ils ont connue pour maximiser leurs profits à l'interaction lors de leurs déplacements précédents. Au début de la simulation, les  $d$ -min et  $d$ -max des Marchands pour chaque Destination correspondent à la localisation des villes de Destination. Le  $d$ -min et  $d$ -max évoluent ensuite avec l'expérience et la répétition des interactions de chaque Marchand. Le principe est le suivant :

- Une fois le choix de la Destination réalisé, l'agent Marchand aura pour but de s'y rendre, mais avec la contrainte de ne pas pouvoir dépasser sa distance acceptable ( $d$ -min ou  $d$ -max).
- Quand un agent Marchand est de retour à sa ville d'Origine, peu importe s'il a échangé ou non, il se choisit une nouvelle Destination le tour suivant (qui peut être la même que celle choisie le tour d'avant).

Sur le temps long, on observe une évolution rapide des  $d$ -min et  $d$ -max de l'ensemble des Marchands. Spatialement, cela se traduit par des intervalles d'interaction entre plusieurs villes qui sont des portions d'arc sur lesquels l'interaction est intense. Ces intervalles d'interaction sont délimités par les  $d$ -min et  $d$ -max respectifs des Marchands des villes (cf. Figure 43).

- Par défaut, un Marchand cherche à atteindre son  $d$ -min, qui est le Lieu le plus rentable qu'il connaisse, pour interagir en direction de sa Destination. Le  $d$ -min( $j$ ) est le Lieu le plus rentable connu d'un Marchand  $M_i$  pour interagir en direction de la Destination  $j$ . Ce Lieu est rentable soit, car le Marchand  $M_i$  parcourt peu de distance pour l'atteindre et y réaliser un échange, soit parce qu'il y rencontre beaucoup de partenaires. S'il n'effectue aucun échange avant ou à sa distance acceptable, alors il rentre à sa ville d'Origine sans avoir échangé, donc avec une perte. Le tour suivant, sa distance acceptable devient alors  $d$ -max puisqu'il n'a pas fait de profit en limitant son déplacement à  $d$ -min. À l'inverse, s'il est parvenu à échanger lors de son premier déplacement, sa distance acceptable reste  $d$ -min.

- Le  $d$ -max correspond au Lieu de l'interaction la moins rentable de l'ensemble des Marchands  $M_i$  souhaitant interagir en direction de la Destination  $j$ . Il est commun à tous les Marchands  $M_i$  de la ville  $i$ , car c'est une information qu'ils se communiquent. En revanche, ils ne s'échangent pas leur  $d$ -min. Ainsi, ils sont donc dans une logique de compétition puisqu'ils n'échangent que sur le Lieu le moins rentable qu'ils connaissent. Ce Lieu du plus faible profit est celui où on maximise la probabilité de trouver un partenaire en parcourant le plus de distance.

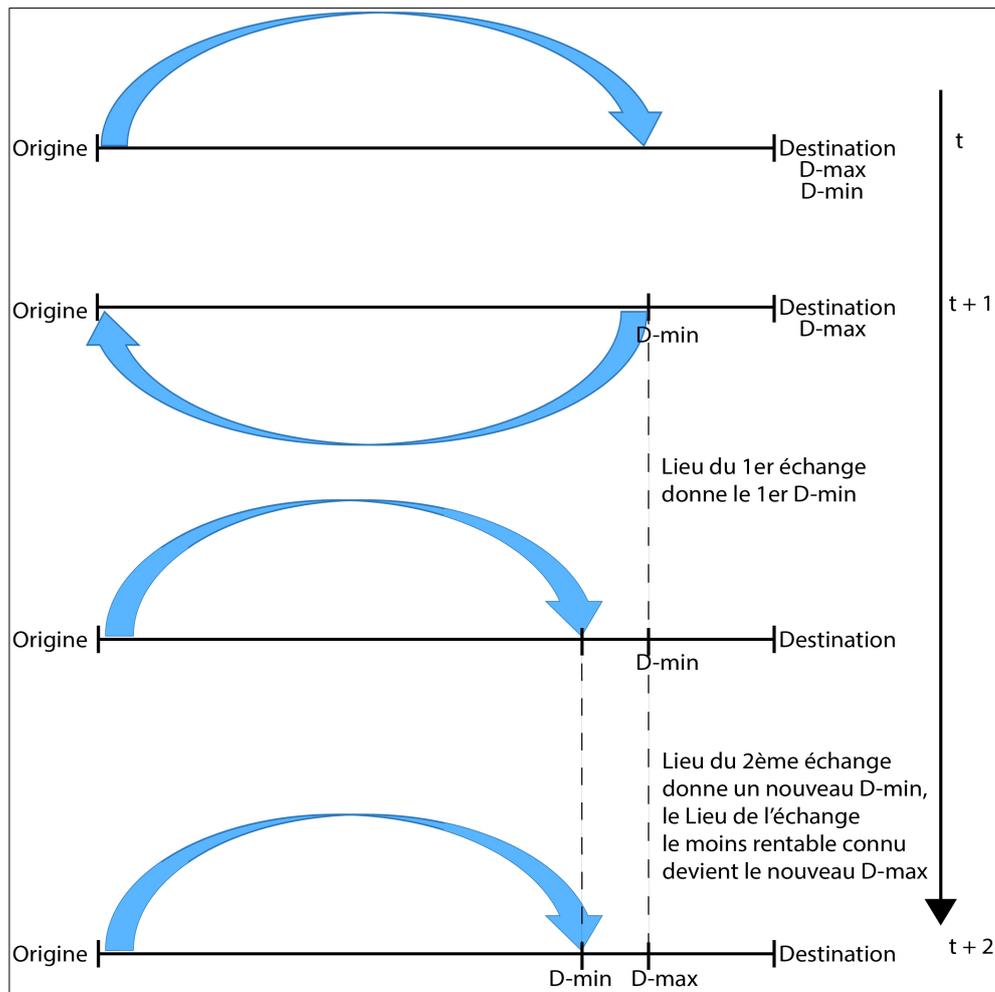


Figure 43: Évolution du D-min et D-max d'un Marchand par son historique des interactions

Le nombre de villes et les topologies de réseau vont faire que les Marchands allant de  $i$  à  $j$  vont parfois devoir traverser des villes intermédiaires  $k$ . L'intervalle d'interaction n'est alors plus aussi simple à délimiter que sur la Figure 44. La structure de certains réseaux font que des intervalles d'interaction se superposent, car les villes les plus intermédiaires et leurs arcs sont sur de nombreux plus courts chemins. Les Marchands passent régulièrement par celles-ci, ce qui augmente la probabilité qu'ils s'y rencontrent et interagissent. Ainsi, une Ville et sa proche périphérie peuvent correspondre à des intervalles d'interaction de plusieurs villes.

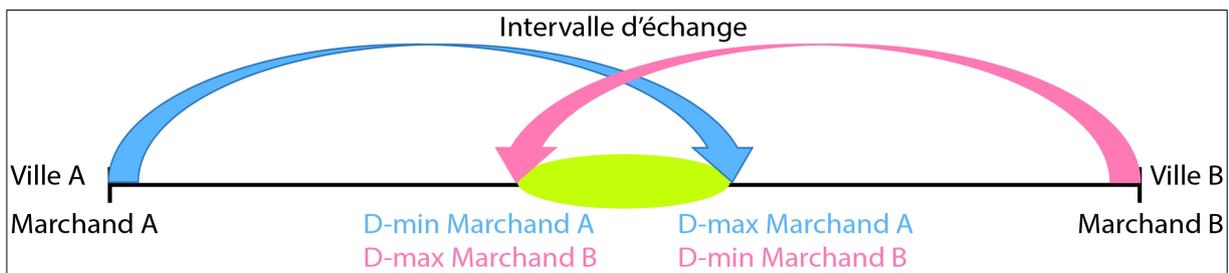


Figure 44: Schématisation d'un intervalle d'échange

Marchand
Id Origine Destination Vitesse D-min par destination D-max par destination Profit Profit-maximum effectué par destination Profit total Seuil de Profit à réaliser pour migrer dans une ville émergente Une distance acceptable
- Choisit une destination () - Interagit avec les Marchands d'Origine différentes () - Enregistre les coordonnées de l'interaction () - Enregistre les gains pour chaque interaction () - Calcule son d-min après chaque interaction () - Calcule son d-max après chaque interaction ()

Figure 45: Diagramme de classe (agent Marchand)

Chaque Lieu, correspondant à une segmentation des arcs du réseau de transport initial, va pouvoir devenir une Ville dès qu'il atteint le « seuil d'émergence ». Ce seuil correspond à un certain nombre d'interactions effectuées sur le Lieu. Ce nombre est une fraction du total des interactions depuis le début de la simulation.

$$\text{seuil émergence} = (eLieu(i) * 100) / E \quad \text{où}$$

- $eLieu(i)$  est le nombre d'interactions réalisées par des Marchands sur le Lieu  $i$ ,
- $E$  le nombre total d'interactions réalisées par les Marchands depuis de début de la simulation.

Les valeurs de seuil d'émergence retenues sont de 7 et 10%. Ces valeurs ne sont pas calibrées sur des valeurs empiriques, puisqu'on ne dispose pas de données permettant d'évaluer à partir de quand une ville émerge. Ces deux valeurs ont été retenues après des jeux d'essais, car elles « tempèrent » le processus d'émergence des villes au cours des simulations. Utiliser des valeurs absolues auraient entraîné, avec l'accroissement du nombre de Marchands et donc du nombre d'interactions, une émergence exponentielle des villes dans le temps entraînant des configurations spatiales peu crédibles. Au contraire, les valeurs retenues vont permettre une dynamique d'émergence relativement continue au long des simulations.

Pour fonder une nouvelle Ville  $i$  en un Lieu  $i$ , il faut des individus. Ils vont correspondre aux Marchands qui répondent aux deux critères suivants :

- avoir effectué son profit-maximal au Lieu  $i$ ,
- avoir atteint son seuil nécessaire de profit-total.

Ces Marchands formeront alors la population initiale de la ville émergente. Mais si aucun Marchand ne répond aux critères, alors la ville n'émergera pas. Dans le cas où il existe plusieurs Lieux d'un même arc à avoir atteint ce seuil, on va prendre le Lieu qui permet d'avoir la plus grande population émergente.

### 3.2.2 Les différents modes d'interaction entre agents Marchands

Un Marchand échange quand, en se déplaçant vers sa Destination, il rencontre un ou plusieurs Marchands d'une Origine différente. Il peut rencontrer de nombreux partenaires sur sa route qui ne sont pas nécessairement des Marchands de la ville vers laquelle il se déplace. Ce constat nous a amenés à modéliser deux conditions pour que des Marchands soient partenaires et interagissent et en tester les conséquences sur l'évolution du système de villes :

- Mode d'interaction ALL : est partenaire d'un Marchand de la ville  $i$  tout Marchand rencontré à partir du moment où il n'est pas originaire de  $i$ .
- Mode d'interaction ORIGINE : ne sont partenaires d'un Marchand de la ville  $i$  que les Marchands rencontrés qui sont originaires de la ville  $j$  que le Marchand de  $i$  a comme Destination.

Le mode d'interaction Origine correspond donc au cas où un Marchand d'une ville  $i$  veut échanger spécifiquement avec ceux de la ville  $j$  pour obtenir un bien particulier, propre à la ville  $j$ . Dans ce cas, il n'interagira pas avec tous les Marchands ayant pour Origine une ville autre que  $j$ , car ils ne sont pas supposés avoir le bien considéré.

Pour le mode d'interaction ALL, ce qui importe c'est de rencontrer des Marchands, peu importe d'où ils viennent. Dans ce cas, le Marchand de la ville  $i$  n'est pas supposé vouloir un bien propre à une ville donnée. Tous les Marchands ont tous les biens, services ou informations et ils peuvent donc échanger avec n'importe quel Marchand qui n'est pas originaire de la même ville. Nous souhaitons voir ce que ce changement peut apporter à la structure finale du système de villes. L'hypothèse est que le mode d'interaction ALL distribue spatialement l'interaction entre les Marchands sur plus d'arcs, ce qui aurait pour conséquence une localisation plus homogène des nouvelles villes. À l'inverse, le mode d'interaction ORIGINE pourrait concentrer l'interaction sur quelques arcs et réduire le nombre de villes émergentes.

### 3.2.3 Émergence de nouveaux arcs après l'émergence des villes

Comme vu précédemment (cf. 2.2), l'évolution des systèmes de villes ne saurait s'envisager sans tenir compte du support des interactions que sont les réseaux de transport. Aussi, si le système de villes évolue par ajout de villes émergentes, il est logique de faire évoluer dans le même temps le système de transport. C'est pourquoi nous avons intégré au modèle la possibilité pour une ville émergente de créer un arc entre elle et une ville attractive. Créer de nouveaux arcs permet non seulement de modéliser l'évolution du réseau, mais aussi et surtout de modifier sa nature en fonction des interactions. Prenons l'exemple d'un cercle afin d'illustrer notre propos. Selon l'algorithme du modèle, chaque nouvelle ville va forcément se positionner entre deux villes, mais sans apporter de modification au réseau.

Ce qui est proposé ici est de fixer une probabilité pour chaque nouvelle Ville de créer une nouvelle connexion vers une autre des  $n$  villes du système. La structure du réseau s'en trouve donc modifiée. Pour la Ville émergente  $i$ , le choix de la Ville  $j$  avec qui se connecter par l'intermédiaire d'un nouvel arc est celle qui maximise  $F_{ij}/D_{ij}$ , où  $F_j$  est la contribution aux interactions de  $j$  et  $D_{ij}$  la distance euclidienne entre  $i$  et  $j$ .

À chaque fois qu'une Ville va émerger lors de la simulation, on va tirer aléatoirement une variable aléatoire entre 0 et 100 pour qu'un nouvel arc soit construit. Si le résultat est supérieur à 50, alors un arc sera créé, sinon la structure du réseau n'est pas modifiée.

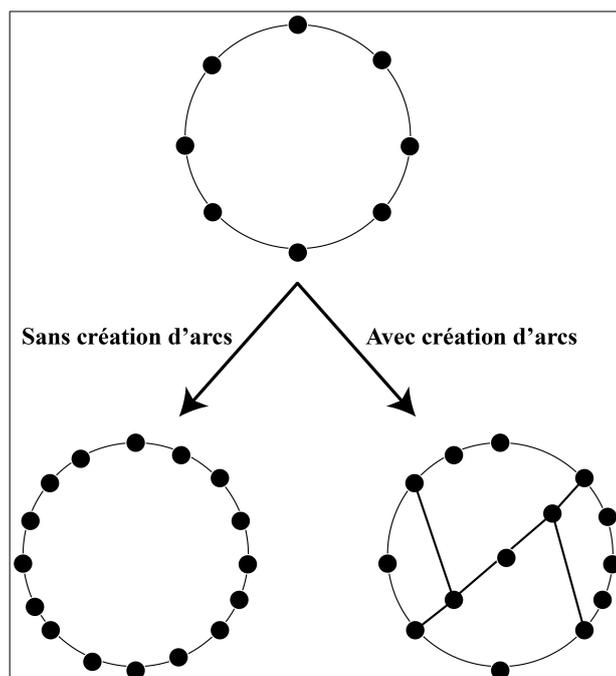


Figure 46: Différence de structure selon la probabilité d'émergence de nouveaux arcs

L'intérêt avec ce processus est de pouvoir modéliser et observer comment la nature du réseau va coévoluer avec le système de villes. Plus particulièrement, on peut voir comment la logique des réseaux peut modifier et redistribuer les attractivités et donc les échanges. Un réseau de type Invariant d'échelle pourra par exemple évoluer vers une structure moins inégalitaire en termes d'intermédiarité. Du point de vue des villes, on peut étudier comment leur centralité et accessibilité vont évoluer avec l'émergence de nouveaux arcs.

Des simulations où il n'y a pas de nouvel arc qui émerge en même temps qu'une nouvelle ville vont tout de même être menées, afin de se concentrer uniquement sur l'étude de la localisation des nouvelles villes.

### 3.3 Le plan d'expérience

Le modèle et les simulations reposent sur plusieurs algorithmes avec différents paramètres à faire varier pour en tester les effets sur la dynamique d'émergence des villes et sur l'évolution de la structure du réseau de transport.

Trois grands types de paramètres ont été intégrés :

- Les paramètres généraux : ce sont les mêmes que pour les modèles précédemment utilisés (population initiale, taux de croissance naturelle, taux de migration, topologie du réseau de transport),
- Les paramètres propres aux agents Marchands qui sont à faire varier pour tester leurs répercussions sur la dynamique d'émergence des villes,
- Les paramètres propres aux Lieux (seuil émergence).

Le tableau ci-dessous synthétise des paramètres utilisés au cours des différentes simulations en distinguant les paramètres fixes et variables.

Paramètres généraux	Paramètres des Marchands	Paramètres des Lieux
<b>Fixe</b>		
Nombre de villes initiales	Vitesse	
Population initiale de chaque ville	Seuil de profit à réaliser pour migrer dans une ville émergente	
Taux croissance naturelle		
<b>Variable</b>		
Taux de migration	Profit	Seuil d'émergence
Topologie	Profit-max par destination	
La probabilité d'émergence de nouveaux arcs	Profit total	
Nombre d'itération	Mode d'interaction	
	D-min par destination	
	D-max par destination	
	Une distance acceptable	

Tableau 27: Les paramètres du modèle « Émergence »

Il est nécessaire de varier les topologies de réseau afin d'étudier leurs effets sur l'émergence des villes et l'évolution du système de villes. En outre, nous voulons étudier comment chaque type de réseau de transport influence les logiques de localisation des nouveaux éléments, et lesquels sont les plus résistants au changement. Pour cela, nous avons modélisé quatre types de réseaux :

- réseau Invariant d'échelle,
- réseau de Manhattan,
- réseau Small world,
- réseau SW (qui est lui aussi un autre réseau de type « *small world* »).

La différence entre les deux réseaux type « *small-world* » est que le réseau Small world est moins dense que le réseau SW puisqu'il a un nombre cyclomatique de 31 contre 121 pour le réseau SW. Le réseau Small world avec un indice Beta de 2, qui correspond au degré moyen du réseau, et un degré de connectivité de 7, propose moins de chemins alternatifs entre chaque ville. Le réseau SW avec un indice Beta de 5 et un degré de connectivité de 3 en possède beaucoup. Enfin, le réseau Small world avec une moyenne des plus courts chemins de 35 et un diamètre de 70 favorise moins l'interaction entre des villes distantes que le réseau SW qui a une moyenne des plus courts chemins de 25 et un diamètre de 53.

Le réseau SW, qui réduit les distances entre chaque couple de villes et propose davantage de chemins alternatifs, est supposé être moins sensible aux évolutions de réseau consécutives à l'émergence de nouvelles villes. C'est cette hypothèse qui a voulu être testée à l'aide des deux réseaux de type « *small-world* ».

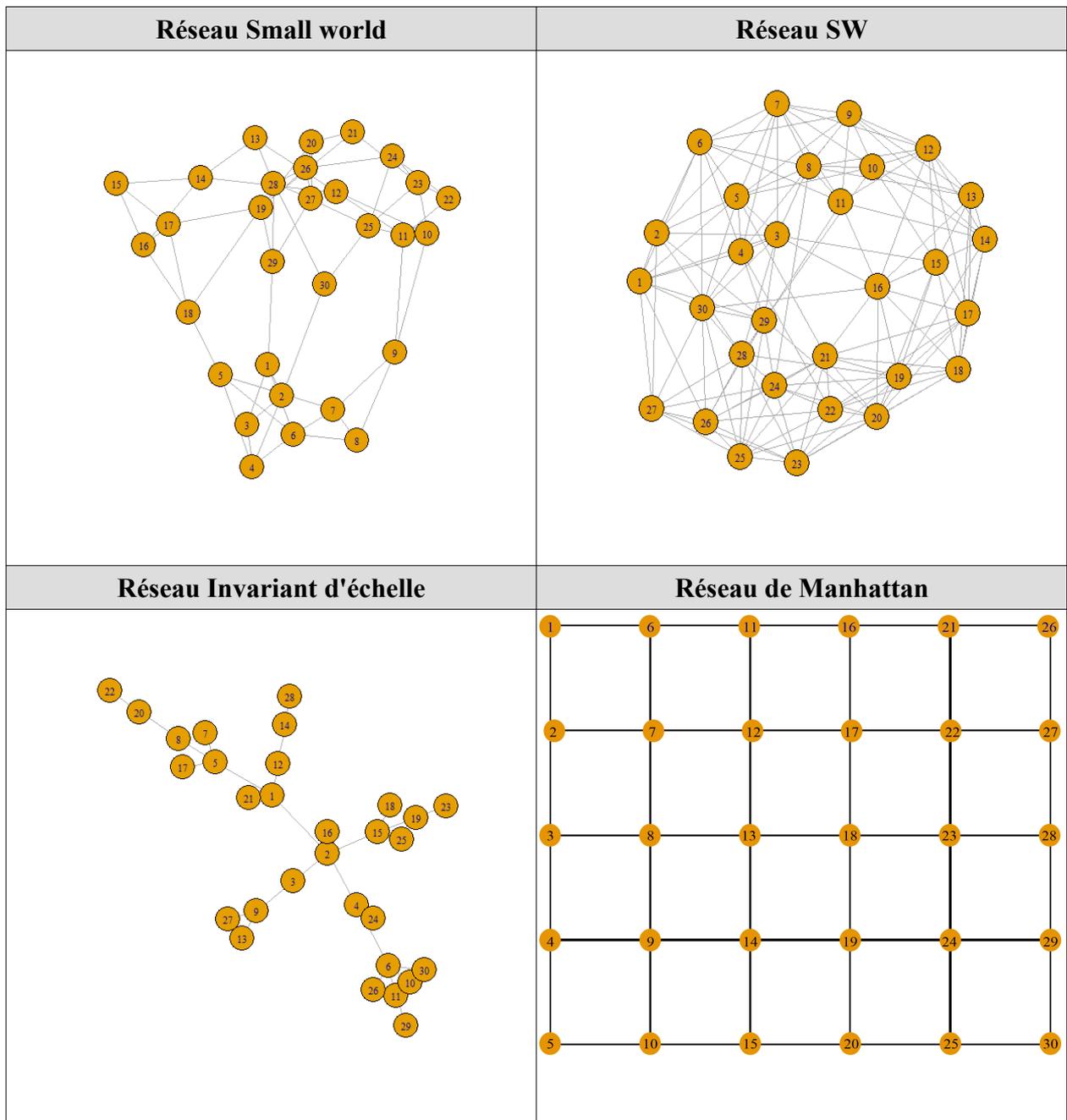


Figure 47: Structure des réseaux types modélisés (modèle « Émergence »)

Indicateurs	Invariant d'échelle	Manhattan	Small world	SW
Nombre cyclomatique	0	20	31	121
Degré de connectivité	15	8	7	3
Indice de Shimbel	31 146	57 420	32 196	22 732
Moyenne des plus courts chemins	34	63	35	25
Diamètre	72	162	70	53
Beta	0.9	1.6	2	5
Eta	8	18	13	14
Pi	3	5	11	40

Tableau 28: Propriétés des différents réseaux modélisés

Ces différentes topologies de réseau vont nous permettre d'étudier l'influence de leurs propriétés topologiques sur les logiques d'émergence des villes et d'évolution du système urbain. On compte ainsi un réseau inégalitaire en termes de connexion, le réseau Invariant d'échelle, avec quelques villes à forte intermédialité, un réseau homogène de type réseau Manhattan et deux réseaux de type *small-world* favorisant l'interaction en limitant le nombre d'intermédiaires entre chaque couple de villes.

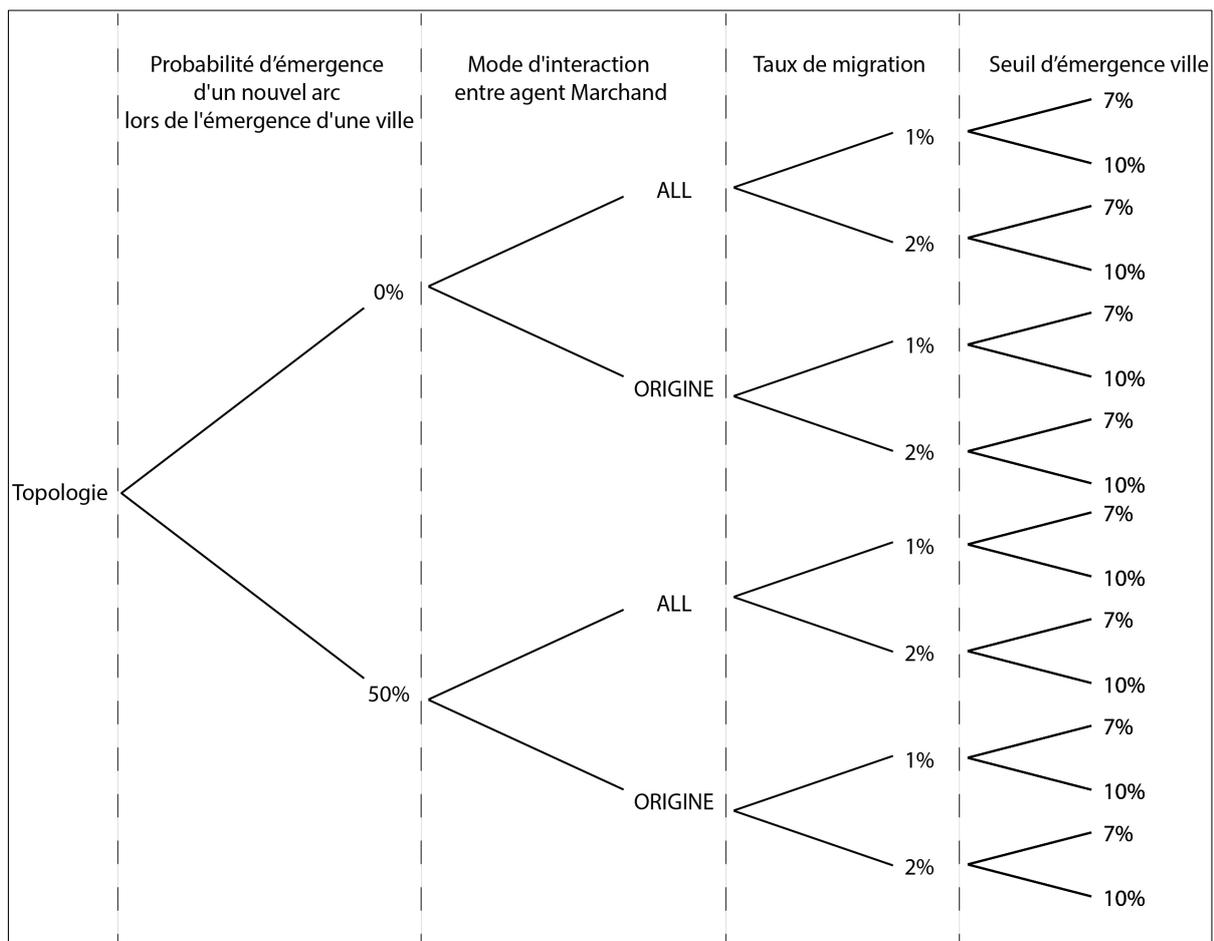


Figure 48: Plan d'expérience par topologie de réseau (modèle « émergence »)

Selon si l'on autorise ou pas la création de nouveaux arcs, selon le mode d'interaction entre agents Marchand (ORIGINE ou ALL), selon la valeur du taux de migration résidentielle choisi (1 ou 2%) et selon le seuil d'émergence d'une nouvelle ville (7 ou 10%), ce sont pour chaque topologie de réseau (Invariant d'échelle, de Manhattan, Small world et SW) 16 jeux de simulations qui sont réalisés.

### 3.3.1 Plateforme utilisée

Nous avons opté dans la Partie 2 pour une modélisation de type SMA sous le logiciel *Netlogo*, afin d'étudier le rôle des interactions entre les villes sur l'émergence et la structure hiérarchique finale des villes. Mais les modèles créés sont gourmands en puissance de calcul et atteignent rapidement les limites d'espace mémoire qu'offre *Netlogo*. L'extension « *network* » de *Netlogo*, qui crée de nombreux *threads*, y contribue notamment.

Pour ces raisons, nous avons opté pour la plateforme *R* pour le modèle « Émergence » afin d'y créer notre propre SMA. Les agents modélisés n'auront pas de réel attribut physique à gérer, puisqu'ils sont représentés sous forme de tableau, ce qui allège le besoin de puissance de calcul.

Le recours à la plateforme *R* permet aussi une plus grande liberté. *R* fonctionne en grande partie par l'intermédiaire de « *packages* » créés et mis à jour par une grande communauté de contributeurs internationaux. Ainsi, *R* n'est pas seulement un logiciel de statistique. Il permet aussi bien de gérer l'étude des réseaux que de prendre en compte des formats SIG tel que le format « *Shape* ». Créer un SMA et traiter ses résultats avec un seul logiciel permet ainsi un gain de temps, car il n'est pas nécessaire de convertir les sorties pour les traiter en temps réel. Cela donne une plus grande autonomie, mais en contrepartie les simulations et résultats sont moins visualisables que sur *Netlogo*.

## 3.4 Résultats

En faisant varier les paramètres du modèle (mode d'interaction, type de réseau, coévolution avec le réseau de transport, etc.), on cherche à voir leurs effets sur la dynamique d'émergence de nouvelles villes. Pour cela, on a étudié le nombre final de nouvelles villes selon les paramètres de simulations, on a comparé les hiérarchies obtenues avec le modèle rang-taille et on a cherché à comprendre les logiques spatio-temporelles de l'émergence des villes.

Afin de pouvoir étudier et comparer les résultats obtenus, nous avons utilisé le même « pas de temps » de simulations (*ticks*). Ici, le *tick* 42 a été retenu, car à partir de celui-ci on ne constate plus de nouvelle émergence, mais une stabilisation du système. Il semble que le modèle soit en état stationnaire après ce nombre de *ticks*. L'hypothèse est que la dynamique d'émergence permet d'atteindre une configuration spatiale qui ne nécessite plus l'émergence de nouvelles villes.

### 3.4.1 L'intensité de l'émergence des nouvelles villes est dépendante des conditions de l'interaction

Le premier constat est que, peu importe les simulations, des villes émergent. En partant de 30 villes initiales, le nombre final de villes varie entre 33 (pour le réseau de Manhattan) et 74 (pour le réseau SW), ce sont donc entre 3 et 44 villes qui s'ajoutent. Le tableau ci-dessous détaille pour chaque simulation le nombre de villes émergentes.

Paramètres	Réseau Invariant d'échelle	Réseau de Manhattan	Réseau Small world	Réseau SW
Probabilité d'émergence de nouveaux arcs : nulle				
Mode interaction	ALL			
Taux migration 1% Seuil émergence ville 7%	25	13	14	32
Taux migration 1% Seuil émergence ville 10%	26	30	13	13
Taux migration 2% Seuil émergence ville 7%	25	11	14	44
Taux migration 2% Seuil émergence ville 10%	29	15	8	23
Mode interaction	ORIGINE			
Taux migration 1% Seuil émergence ville 7%	12	5	16	14
Taux migration 1% Seuil émergence ville 10%	10	5	16	12
Taux migration 2% Seuil émergence ville 7%	10	5	17	13
Taux migration 2% Seuil émergence ville 10%	10	5	17	12
Probabilité d'émergence de nouveaux arcs : 50 %				
Mode interaction	ALL			
Taux migration 1% Seuil émergence ville 7%	28	6	15	28
Taux migration 1% Seuil émergence ville 10%	17	8	18	18
Taux migration 2% Seuil émergence ville 7%	22	7	18	27
Taux migration 2% Seuil émergence ville 10%	17	6	17	22
Mode interaction	ORIGINE			
Taux migration 1% Seuil émergence ville 7%	11	3	16	14
Taux migration 1% Seuil émergence ville 10%	10	7	15	12
Taux migration 2% Seuil émergence ville 7%	10	4	16	13
Taux migration 2% Seuil émergence ville 10%	10	4	17	12

Tableau 29: Nombre villes émergentes par simulation

Spatialement, les figures ci-dessous permettent de voir où émergent ces nouvelles villes pour les différents types de réseaux.

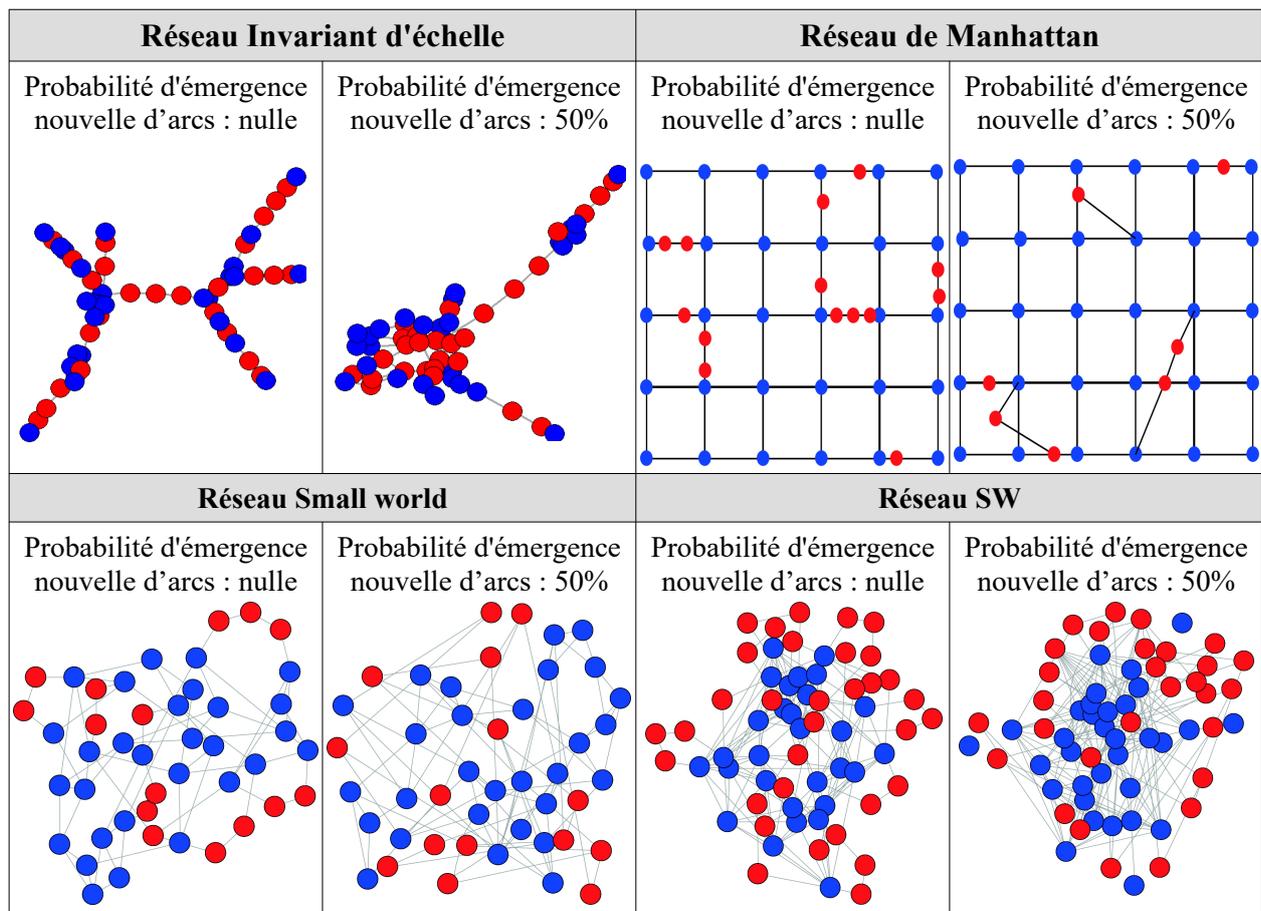


Figure 49: Structure schématique du système de villes en fin de simulation pour un mode d'interaction ALL entre agents Marchands et pour chaque réseau modélisé (en bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes)

Le nombre de villes émergentes et leur localisation variant selon les simulations, nous avons cherché à en comprendre les déterminants. Deux des paramètres testés se sont avérés avoir une influence très importante : le mode d'interaction entre les agents Marchands et le type de réseau de transport. Dans une moindre mesure, la probabilité d'émergence d'un nouvel arc avec l'émergence d'une nouvelle ville a aussi son importance.

À l'inverse, il s'est avéré que le taux de migration et le seuil d'émergence d'une nouvelle ville impactent relativement peu la dynamique d'émergence de villes, avec les valeurs testées. Le taux de migration permet d'augmenter les flux migratoires, ce qui accroît plus rapidement les écarts d'attraction entre les villes et impacte principalement, mais peu, la hiérarchie finale.

Ces constats étant faits, la suite se concentre sur les paramètres plus impactants, à savoir les modalités d'interaction entre Marchands sur la structure des réseaux de transport et la conséquence de l'évolution de leur topologie.

### 3.4.2 Le nombre de nouvelles villes est influencé par le mode d'interaction entre les agents Marchands

Pour apprécier et isoler l'effet des différents modes d'interaction (ALL, ORIGINE) sur l'intensité de l'émergence des villes, nous n'avons retenu que les simulations sans émergence de nouveaux arcs. Le mode d'interaction ALL, qui permet à un Marchand d'échanger avec n'importe quel autre Marchand rencontré et non pas seulement ceux de la ville de Destination, fait émerger le plus de villes. Le nombre minimum de nouvelles villes obtenu est de 8, et le maximum est de 44. Ce sont les réseaux Invariant d'échelle et SW qui vont alors connaître la plus forte intensité d'émergence des villes. Pour le mode d'interaction ORIGINE, le nombre minimum est de 5, et le maximum est de 17 (réseau Small world). Le mode d'interaction entre les Marchands modifie les logiques d'émergence puisque ce ne sont pas les mêmes réseaux qui font émerger le plus de villes en fonction du mode d'interaction simulé.

D'un point de vue géographique, le mode d'interaction ORIGINE correspond plus à une réalité territoriale puisqu'on interagit uniquement avec les individus de la ville produisant les biens et services désirés. Il n'y a pas d'intérêt à échanger avec les individus des villes rencontrés lors du déplacement si leur ville d'Origine ne possède pas le bien souhaité. C'est pour cela que l'interaction est alors concentrée sur quelques arcs routiers en direction des villes les plus attractives. L'émergence des nouvelles villes est alors très localisée et moins intense. Le mode d'interaction ALL représente le fait d'échanger avec n'importe quel partenaire, ce qui va conférer une plus grande importance aux villes périphériques des villes attractives. La répartition spatiale des interactions, et donc de l'émergence des nouvelles villes, est plus homogène sur le territoire, et l'émergence plus fréquente.

### 3.4.3 Les topologies de réseau modélisées n'offrent pas les mêmes potentiels d'émergence

Pour isoler l'effet du réseau de transport sur la dynamique et l'intensité de l'émergence des villes, là encore nous n'avons retenu que les simulations sans émergence de nouveaux arcs afin d'écarter les effets que peut induire la coévolution du système de villes avec le réseau de transport.

Le minimum de villes émergentes est de 5 et le maximum de 44. Dans l'ordre, les topologies de réseau qui font émerger le plus de villes sont le réseau SW, le réseau Invariant d'échelle, le réseau Small world et le réseau de Manhattan.

Pour chaque réseau, on calcule le nombre total de villes à avoir émergé pour l'ensemble des simulations. Le rapport entre le nombre total de nouvelles villes entre le réseau SW et le réseau de Manhattan est de 1.8 ; cela montre l'influence de la topologie sur la dynamique d'émergence. L'intensité de l'émergence n'est pas la même selon le réseau support de l'interaction.

Réseau	Nombre total de nouvelles villes	Nombre moyen de nouvelles villes	Maximum de nouvelles villes pour une simulation	Minimum de nouvelles villes pour une simulation
SW	163	20	44	12
Invariant d'échelle	147	18	29	10
Small world	115	14	17	8
Manhattan	89	11	30	5

Tableau 30: Influence de la topologie sur l'intensité de l'émergence des villes

La topologie du réseau de transport modélisée influence la dynamique d'émergence. Chaque réseau a ses propres caractéristiques topologiques qui ont pour conséquence de ne pas distribuer de la même manière les potentiels d'interaction à chaque ville. L'algorithme du modèle repose sur l'interaction entre les Marchands des Villes. Il est alors logique de constater que la topologie du réseau va plus ou moins favoriser l'intensité des interactions sur de nombreux Lieu créant alors plus de villes.

### 3.4.4 Conséquence de l'évolution de la topologie des réseaux sur la dynamique d'émergence

Permettre au système de modifier son réseau de transport favorise-t-il l'émergence de nouvelles villes ? On ne retient que les simulations avec le mode d'interaction ALL, car la variation du nombre de villes final, pour les diverses simulations, avec le mode d'interaction ORIGINE est faible.

Pour l'ensemble des simulations retenues avec une probabilité d'émergence de nouveaux arcs nulle, le minimum de villes qui émerge est de 8, le maximum est de 44 et la moyenne est de 21. Dans l'ordre, les réseaux qui font émerger le plus de villes sont le réseau SW, Invariant d'échelle, Manhattan et Small world. Pour les simulations qui permettent une coévolution avec le réseau de transport, le minimum de villes qui émerge est de 6, le maximum est de 28 et la moyenne est de 17. Dans l'ordre, les réseaux qui font émerger le plus de villes sont SW, Invariant d'échelle, Small world et Manhattan.

Le nombre de villes qui émerge est plus faible lorsque le réseau de transport coévolve avec le système de villes. Pour le réseau de Manhattan, la diminution de l'intensité de l'émergence des villes est marquée, comme l'illustre le rapport entre le nombre de villes qui émergent, sans et avec évolution de la topologie de réseau, compris entre 1.5 et 3.7. Il n'y a que pour le réseau Small world que le nombre de villes qui émerge est légèrement supérieur. Donc, la dynamique de coévolution du réseau de transport avec le système de villes modifie les logiques d'émergence des nouvelles villes en diminuant son intensité. L'adaptation du système se fait via le réseau plutôt que par la création de villes.

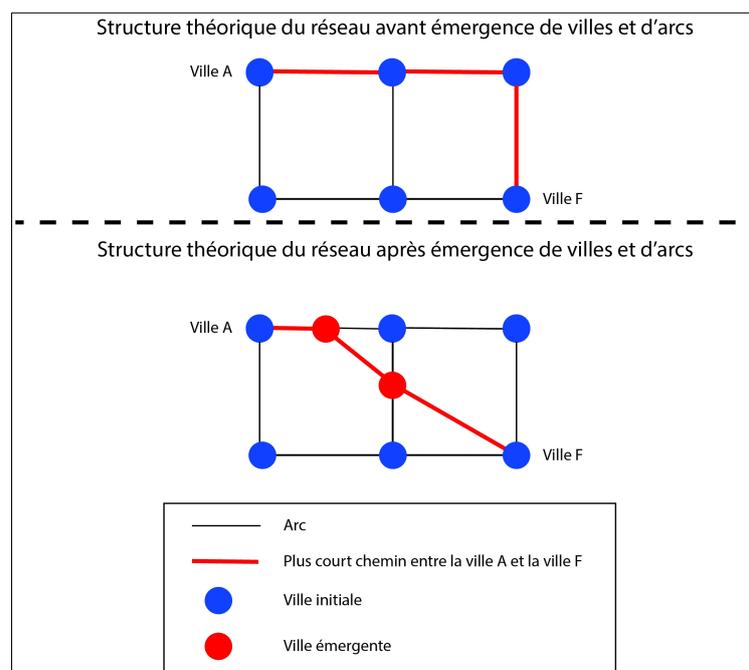


Figure 50: Évolution des plus courts chemins (distance Lieux) en fonction de l'évolution de la structure du réseau

Dès lors que le réseau de transport évolue suite à l'émergence d'une nouvelle ville, de nouveaux plus courts chemins se créent à destination des villes les plus attractives, ce qui améliore leur accessibilité et ne nécessite plus autant l'émergence de nouvelles villes pour maximiser les interactions. Quand les villes les plus attractives du système sont bien desservies, il n'est plus nécessaire de faire émerger de nouvelles villes pour maximiser les interactions. Ces simulations tendent à montrer que si d'emblée les modes de transport avaient été plus efficaces, le nombre de villes aurait été plus faible, comme si on avait gommé les petites villes d'un système christallérien (Christaller, 1933).

Pour conclure, faisons un rapide bilan des paramètres de l'interaction qui maximisent et minimisent l'émergence des villes :

- Les deux configurations qui maximisent l'émergence :

*Mode d'interaction ALL + réseau SW + Probabilité d'émergence de nouveaux arcs nulle*

*Mode d'interaction ALL + réseau Invariant d'échelle + Probabilité d'émergence de nouveaux arcs nulle*

- La configuration qui minimise l'émergence :

*Mode d'interaction ORIGINE + réseau Manhattan + coévolution avec le réseau de transport*

Le nombre final de villes qui émergent au cours des simulations est le résultat de la combinaison de plusieurs paramètres liés à l'interaction (mode d'interaction, type de réseau, la coévolution avec le réseau de transport) qui vont plus ou moins favoriser l'interaction entre les villes ; les modes d'interaction entre les agents Marchands et les topologies de réseaux favorisent l'interaction de certaines villes ; l'émergence de nouveaux arcs va limiter le nombre de nouvelles villes, car la topologie du réseau évolue afin de renforcer le potentiel d'interaction des villes les plus attractives. Donc, l'émergence de nouvelles villes n'est plus nécessaire pour réduire les distances moyennes de l'ensemble des villes vers les villes les plus attractives.

D'un point de vue géographique et historique, on peut donc dire que le réseau de transport n'est pas que le support de l'interaction. Il conditionne par sa métrique la possibilité même de l'émergence et son intensité. Donc, on n'a pas un lien de causalité simple entre l'évolution du réseau de villes – évolution du réseau, mais bien une interaction entre les deux, l'un conditionnant l'autre et réciproquement.

S'il a été mis en avant le rôle des paramètres de l'interaction sur la dynamique d'émergence de nouvelles villes, il reste à étudier la conséquence de l'émergence sur la structure hiérarchique des systèmes de villes.

### **3.4.5 La convergence des distributions hiérarchiques vers une structure unique**

Un des objectifs de la prise en compte de l'émergence de nouvelles villes et de la coévolution entre réseaux de transport et systèmes de villes est de voir si, en gardant les mêmes logiques de modélisation, il est possible de simuler des systèmes urbains se rapprochant davantage d'une distribution rang-taille. En effet, les systèmes urbains empiriques connaissent dans le temps long une augmentation du nombre de villes et une densification des réseaux de transport dont on peut

aisément penser qu'elles influencent le devenir des villes initiales du système considéré ainsi que sa distribution spatiale et hiérarchique finale. Leur prise en compte est donc nécessaire, même si la plupart des modèles simulant la croissance allométrique des systèmes de villes utilisent un nombre de villes fixe.

L'objectif de cette sous-section est donc de comparer globalement les systèmes de villes obtenus pour le modèle « Émergence » avec le modèle rang-taille et d'analyser dans le détail l'émergence des villes et leurs effets : quelles sont les trajectoires des villes qui émergent ? Restent-elles de petites villes, ou au contraire parviennent-elles à terme à figurer parmi les villes les plus importantes du système ? Entrent-elles en concurrence avec les villes initiales proches, au point de limiter leur croissance, ou au contraire renforcent-elles leur capital spatial et ainsi leur capacité à croître ?

#### ***3.4.5.1 Une convergence des distributions hiérarchiques des villes vers un modèle unique***

Il est important de préciser de prime abord que l'étude de la hiérarchie finale des systèmes de villes simulés avec le modèle « Émergence » doit être considérée avec un certain recul. En effet, à l'état initial, les systèmes simulés sont composés de 30 villes et à l'état final ils ne dépassent pas les 100 villes. Aussi, le nombre de villes du système reste relativement limité, ce qui réduit la robustesse des analyses des écarts à la loi rang-taille, sans toutefois les rendre impossibles.

L'étude des écarts à la loi rang-taille reprend la même méthodologie que celle utilisée précédemment. Sont calculés la somme des écarts en valeur absolue à la distribution théorique de Zipf, le ratio entre la taille de la première et la dernière ville de la hiérarchie, puis le même ratio calculé pour la taille moyenne des 10% de villes les plus peuplées et les 10% les moins peuplées.

L'impact de l'émergence de nouvelles villes sur la hiérarchie urbaine finale est analysé pour les systèmes obtenus avec et sans émergence de nouveaux arcs. Les hiérarchies urbaines sont ensuite mises en comparaison avec celles obtenues lors des simulations sans émergence de nouvelles villes (mais avec les mêmes paramètres d'interaction et de croissance). Cette comparaison permet alors d'apprécier la conséquence de l'émergence des villes sur la structure finale de la hiérarchie urbaine.

***Les résultats de l'étude des distributions hiérarchiques obtenues après simulation avec le modèle « Émergence » mettent en évidence que pour toutes les topologies de réseau simulées, il existe une convergence de la structure des distributions statistiques obtenues. Au contraire, pour les simulations qui ne prennent pas en compte l'émergence des villes, les structures et distributions hiérarchiques varient en fonction de la structure des réseaux de transport. Ainsi, la prise en compte de l'émergence de nouvelles villes produit des structures hiérarchiques relativement similaires : peu de grandes villes et beaucoup de petites.***

La moyenne de la Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue pour les simulations sans émergence de nouvelles villes est de 19. Cette même moyenne a été calculée pour les simulations selon le mode d'interaction et la probabilité d'émergence de nouveaux arcs. Elle est comprise entre 10.6 et 11.4. Les nouvelles distributions tendent à converger ou du moins à réduire les écarts au modèle rang-taille.

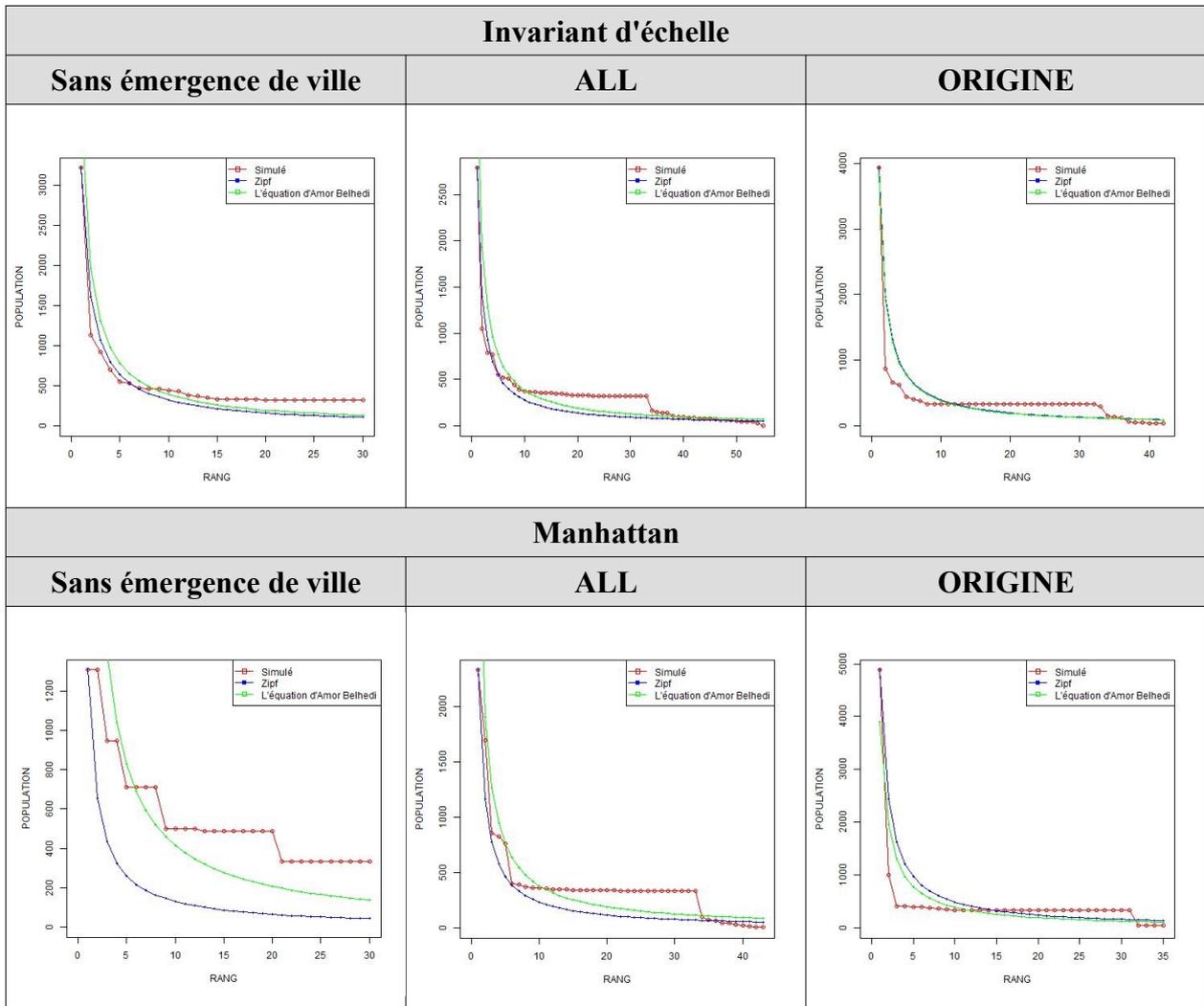


Figure 51: Distributions hiérarchiques selon le type de réseau (migration : 1%, seuil émergence : 7%, sans émergence de nouveaux arcs)

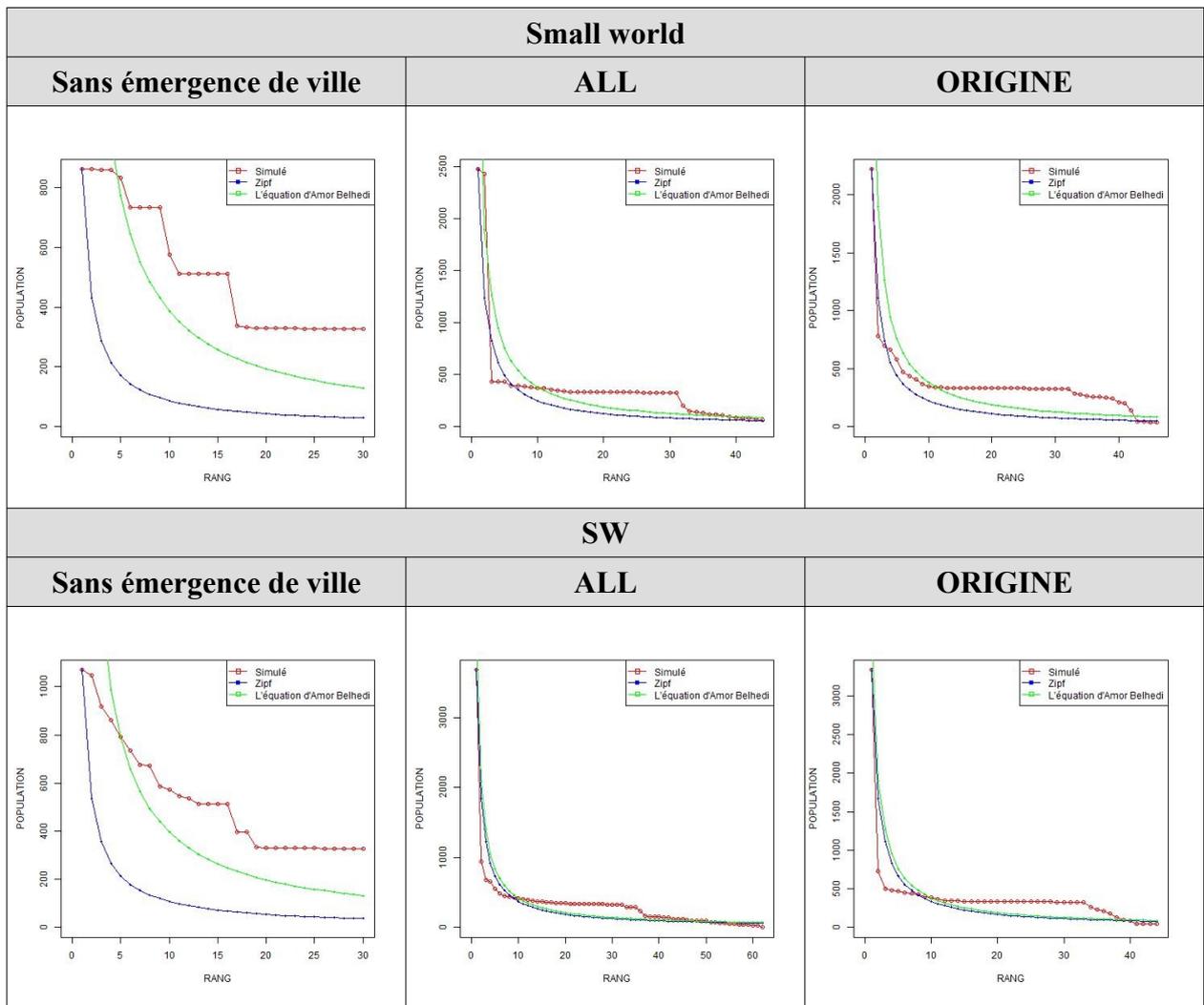


Figure 52: Distributions hiérarchiques selon le type de réseau (migration : 1%, seuil émergence : 7%, sans émergence de nouveaux arcs) (suite)

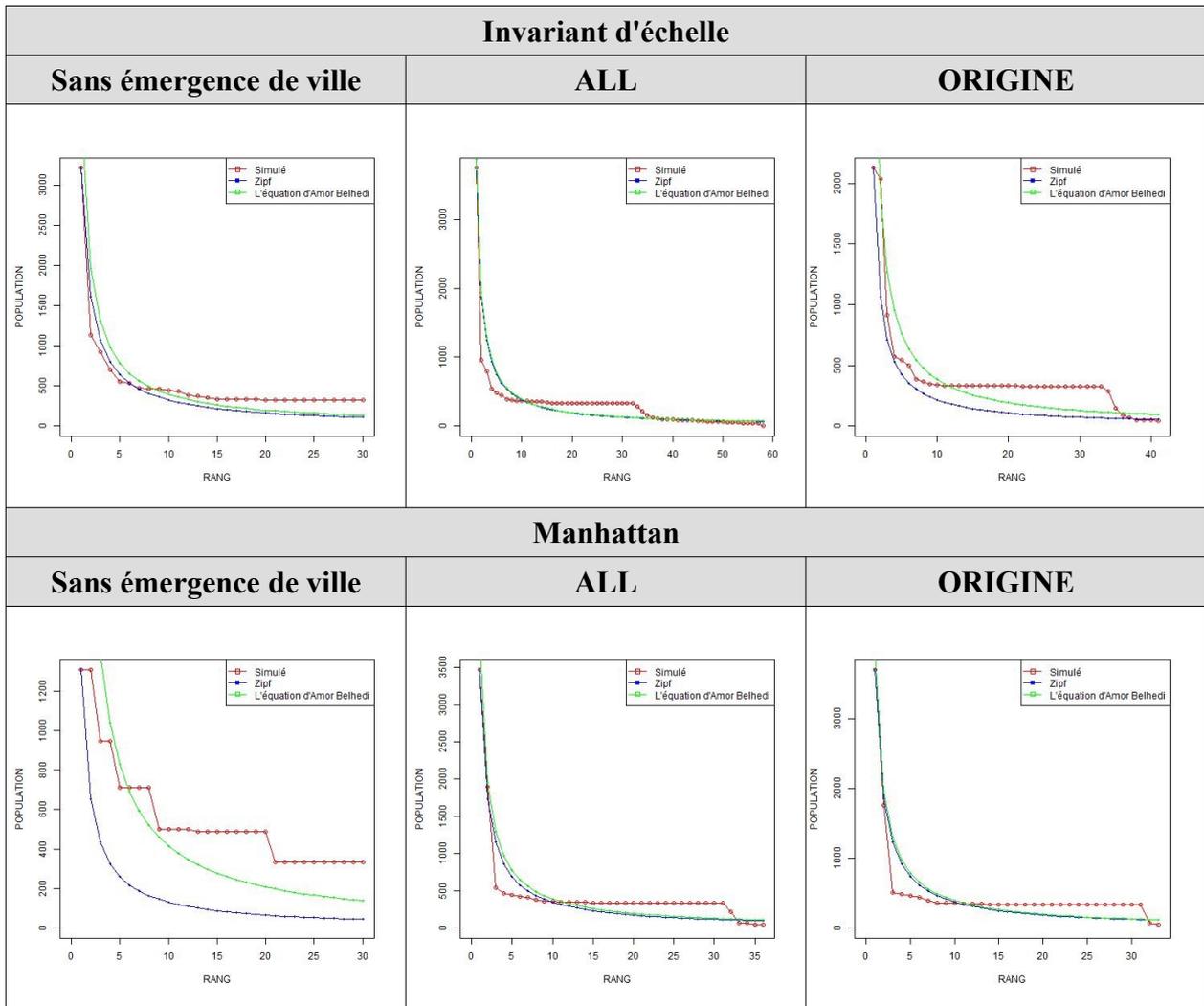


Figure 53: Distributions hiérarchiques pour les réseaux Invariant d'échelle et de Manhattan (migration : 1%, seuil émergence : 7%, émergence de nouveaux arcs)

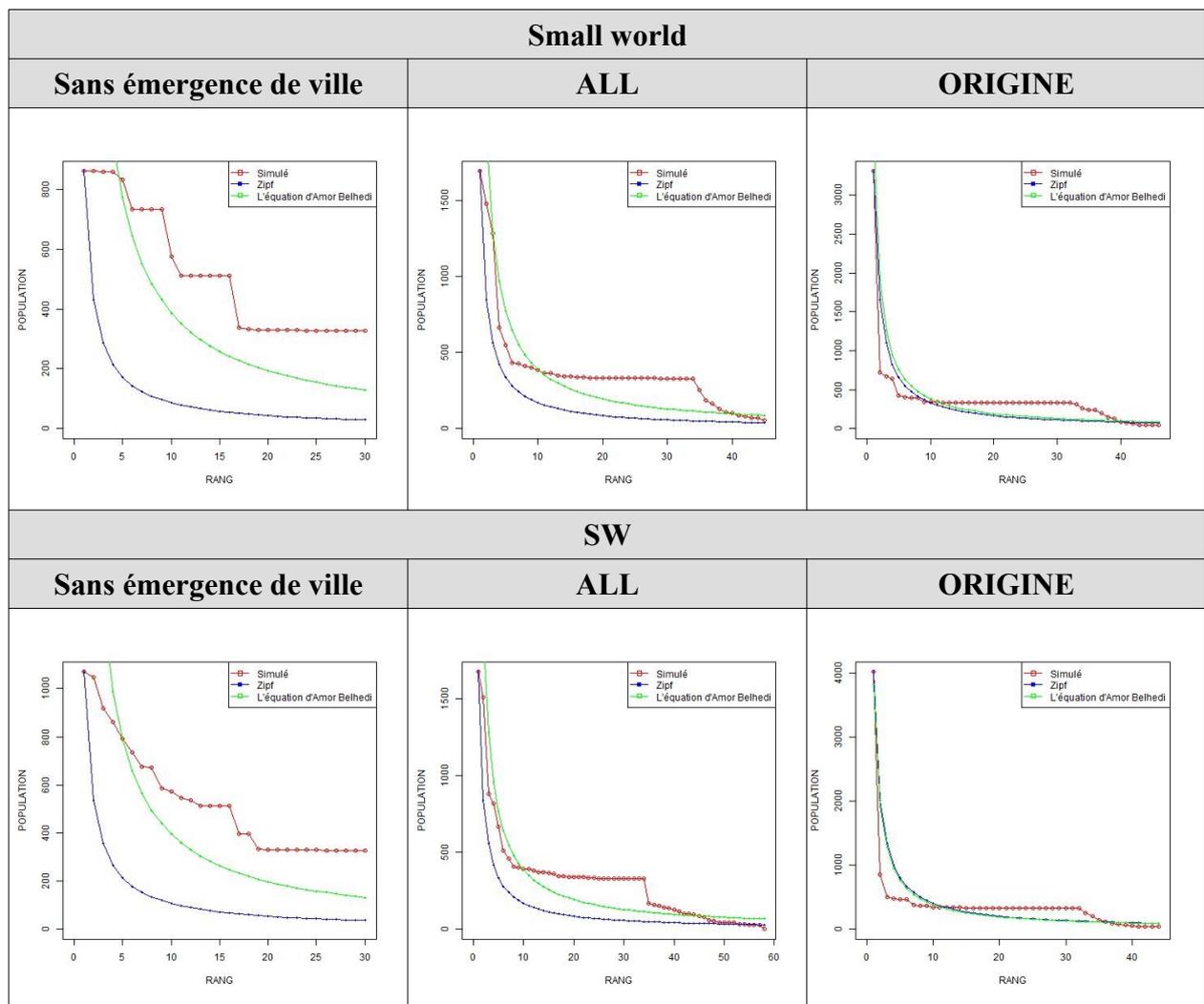


Figure 54: Distributions hiérarchiques des réseaux Small World et SW (migration : 1%, seuil émergence : 7%, émergence de nouveaux arcs)

La possibilité de faire émerger de nouvelles villes, et la possibilité de faire évoluer le réseau, conduisent donc à produire des systèmes de villes aux distributions statistiques plus uniformes. La diversité des structures observées pour différents types de réseaux initiaux se réduit fortement quand l'émergence est prise en compte.

Par ailleurs, la comparaison des systèmes obtenus avec la loi rang-taille montre qu'ils se rapprochent davantage du modèle que ceux obtenus sans émergence et que leur hiérarchie est plus accentuée. La somme des écarts à la loi rang-taille diminue en effet et les ratios entre la taille de la première et de la dernière ville et entre les 10% les plus grandes et les 10% les plus petites sont nettement plus importants.

	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue		Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)		Ratio entre la taille moyenne du premier décile et du dernier décile (simulé)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Modèle sans émergence de nouvelles villes	15	25	2	13	2	8
Modèle « Émergence » Mode d'interaction : ALL	5	25	32	8 086	6	319
Modèle « Émergence » Mode d'interaction : ORIGINE	5	23	7	229	6	75

*Tableau 31: Comparaison des distributions hiérarchiques simulées (pour tous les réseaux) selon la possibilité ou pas de faire émerger de nouvelles villes et selon le mode d'interaction*

Les sommes des écarts à la loi rang-taille obtenues sont relativement faibles (entre 5 000 et 25 000), les réseaux Small world et Invariant d'échelle étant ceux pour qui elles sont les plus faibles. Le réseau de Manhattan présente à l'inverse les plus forts écarts, qui sont dans les mêmes proportions (entre 16 000 et 25 000), que l'on simule l'émergence ou pas (cf. Annexe C).

En ce qui concerne les ratios de taille entre les premières et les dernières villes, ils sont plus faibles pour les simulations sans émergence de nouvelles villes. En effet, ils sont compris entre 2 et 13 entre la première et dernière ville et entre 2 et 8 entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile. Selon le réseau de transport modélisé, il y aura une inégalité de peuplement plus ou moins forte entre le sommet et la queue de la hiérarchie (cf. 2.5.5).

En ce qui concerne les simulations avec émergence de nouvelles villes, les ratios entre la taille de la première et de la dernière ville sont les plus forts pour le réseau de Manhattan, avec un maximum de 4 649 pour les simulations avec une probabilité d'émergence de nouveaux arcs nulle, et un maximum de 8 086 pour les simulations qui étudie la coévolution avec le réseau de transport. Ce réseau peut, en fonction des paramètres de simulation, être très sensible et créer de grandes inégalités de croissance. Arrivent ensuite le réseau Invariant d'échelle avec un maximum de 3 994 (probabilité d'émergence de nouveaux arcs nulle) et de 4 752 (probabilité d'émergence de nouveaux arcs de 50%), puis le réseau SW avec un maximum de 3 682 pour une interaction entre Marchands de type ALL. Dès lors qu'il y a émergence de nouvelles villes, l'inégalité de peuplement entre le sommet et la queue de la hiérarchie s'accroît.

Le mode d'interaction ALL a pour conséquence d'aboutir à des inégalités de peuplement marquées entre les premières et les dernières villes, contrairement au mode d'interaction ORIGINE.

Réseau	Taux migration	Seuil émergence	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue		Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)		Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la moyenne du dernier décile (simulé)	
			ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE
Mode d'interaction			ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE
Invariant d'échelle	1	7	6	6	2787	87	49	12
Invariant d'échelle	1	10	6	6	125	40	26	27
Invariant d'échelle	2	7	7	6	158	157	50	63
Invariant d'échelle	2	10	7	8	3994	52	319	19
Manhattan	1	7	16	16	194	119	71	37
Manhattan	1	10	19	16	2160	119	52	37
Manhattan	2	7	24	23	159	229	53	75
Manhattan	2	10	25	23	4649	228	64	75
Small world	1	7	7	7	40	60	16	16
Small world	1	10	7	8	36	53	9	16
Small world	2	7	5	12	50	88	14	51
Small world	2	10	8	8	76	105	21	50
SW	1	7	7	6	3682	77	35	20
SW	1	10	12	8	24	42	6	20
SW	2	7	17	6	2292	127	59	20
SW	2	10	10	11	553	65	62	19

Tableau 32: Comparaison au modèle théorique (modèle « Émergence », sans création de nouveaux arcs). Valeurs maximales en rouge

Réseau	Taux migration	Seuil émergence	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue		Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)		Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la moyenne du dernier décile (simulé)	
			ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE
Mode d'interaction			ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE	ALL	ORIGINE
Invariant d'échelle	1	7	6	7	3749	50	27	8
Invariant d'échelle	1	10	7	6	3915	55	8	40
Invariant d'échelle	2	7	6	14	4752	201	65	6
Invariant d'échelle	2	10	5	7	276	92	54	6
Manhattan	1	7	16	16	73	84	27	8
Manhattan	1	10	16	16	66	52	8	40
Manhattan	2	7	24	23	8086	7	65	6
Manhattan	2	10	23	23	211	10	54	6
Small world	1	7	9	6	32	87	16	25
Small world	1	10	5	7	96	60	31	24
Small world	2	7	6	5	172	134	39	44
Small world	2	10	13	12	216	72	47	46
SW	1	7	10	7	1673	93	41	28
SW	1	10	12	9	121	36	24	18
SW	2	7	7	9	169	158	57	37
SW	2	10	11	6	245	92	60	31

Tableau 33: Comparaison au modèle théorique (modèle « Émergence », avec création de nouveaux arcs 50%). Valeurs maximales en rouge

Ainsi, la hiérarchie urbaine pour le réseau de Manhattan est impactée par l'émergence de nouvelles villes qui modifient à terme sa structure spatiale et sa logique de mise en relation par ajout d'arcs. Chaque ville a initialement un potentiel d'interaction globalement homogène, car le nombre de connexions de chaque ville est identique, hormis pour les villes en bordure du réseau de transport, et la longueur de chaque arc est également identique. L'émergence de nouvelles villes, et conséquemment d'arcs, modifie la topologie et les caractéristiques du réseau de transport ce qui crée une inégalité dans le potentiel d'interaction et de croissance des villes. Rappelons que le réseau de Manhattan ne peut correspondre qu'à une politique d'aménagement forte et holistique. Il s'oppose au « laisser-faire » ou à l'auto-organisation du système. Dès lors qu'il est soumis à une dynamique d'émergence, qui répond à un enjeu de maximisation des profits par les individus qui composent les villes, sa structure s'en trouve modifiée. Un tel réseau ne peut maintenir une faible hiérarchie quand sa structure évolue vers des potentiels d'interaction inégaux.

Ainsi, la prise en compte de l'émergence des villes et la possibilité de faire évoluer le réseau en cours de simulation n'ont pas les mêmes impacts sur les systèmes de villes obtenus selon la logique des réseaux considérés, qui correspondent globalement à des logiques spécifiques d'aménagement (équité spatiale pour le réseau de Manhattan, performance économique et gouvernance centrale pour le réseau Invariant d'échelle, etc.).

En laissant émerger les villes et évoluer en conséquence le réseau, ce qui correspondrait à une absence de contrôle centralisé, on observe que les systèmes de villes évoluent dans la même direction et tendent vers une organisation spatiale unique de type rang-taille (peu de grandes

villes, quelques moyennes villes et beaucoup de très petites villes) qui constitue une sorte « d'attracteur ».

### 3.4.5.2 Les villes émergentes restent majoritairement modestes

Après avoir vu que la simulation de l'émergence de villes et de l'évolution des réseaux tend à faire converger les structures hiérarchiques des systèmes de villes, quelle que soit la logique initiale du réseau, étudions plus en détail la place que prennent les villes émergentes dans les hiérarchies obtenues. La question est ici de savoir si les villes initiales, qui ont un avantage de taille par rapport aux villes qui émergent, maintiennent cet avantage ou si au contraire des villes qui n'existaient pas initialement peuvent s'imposer et bousculer les systèmes. On retrouve une nouvelle fois la question de la *path dependency* à savoir : une fois une configuration en place (un système de villes initiales) y a-t-il possibilité de la modifier fortement ?

Rappelons que la population initiale d'une ville qui émerge correspond au nombre de Marchands qui viennent s'y implanter en fonction du profit qu'ils y ont fait, et non pas en fonction des agents Migrants qui eux vont gonfler la population de cette ville lors des flux migratoires simulés.

Les résultats montrent que les nouvelles villes ne parviennent pas avec le modèle « Émergence » à renverser « l'ordre établi ». Elles restent de petites villes en fin de simulation, majoritairement en fin de hiérarchie et sous l'influence et l'attraction des villes initiales (cf. Annexe D).

Toutefois, ces nouvelles villes vont néanmoins permettre de faire converger les distributions hiérarchiques vers une structure identique. Quelques-unes vont parvenir à atteindre le sommet de la hiérarchie quand les autres vont former la queue de la distribution.

À titre d'illustration, nous avons mis deux distributions hiérarchiques pour lesquelles nous avons ensuite supprimé la première ville et représenté la distribution hiérarchique sur une échelle logarithmique afin de mieux visualiser l'insertion des villes émergentes (cf. Figure 55 et 56).

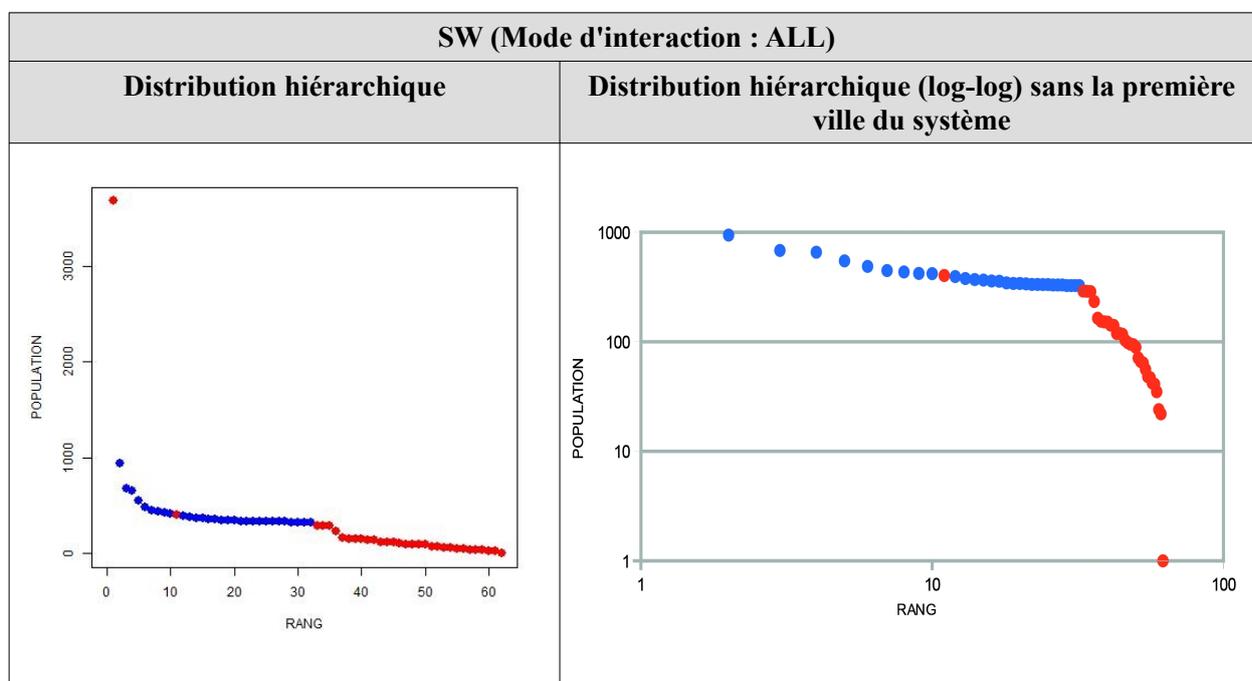


Figure 55: Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour le réseau SW (migration:1%, seuil émergence 7%, mode d'interaction ALL, Probabilité d'émergence nouvelle d'arcs : nulle)

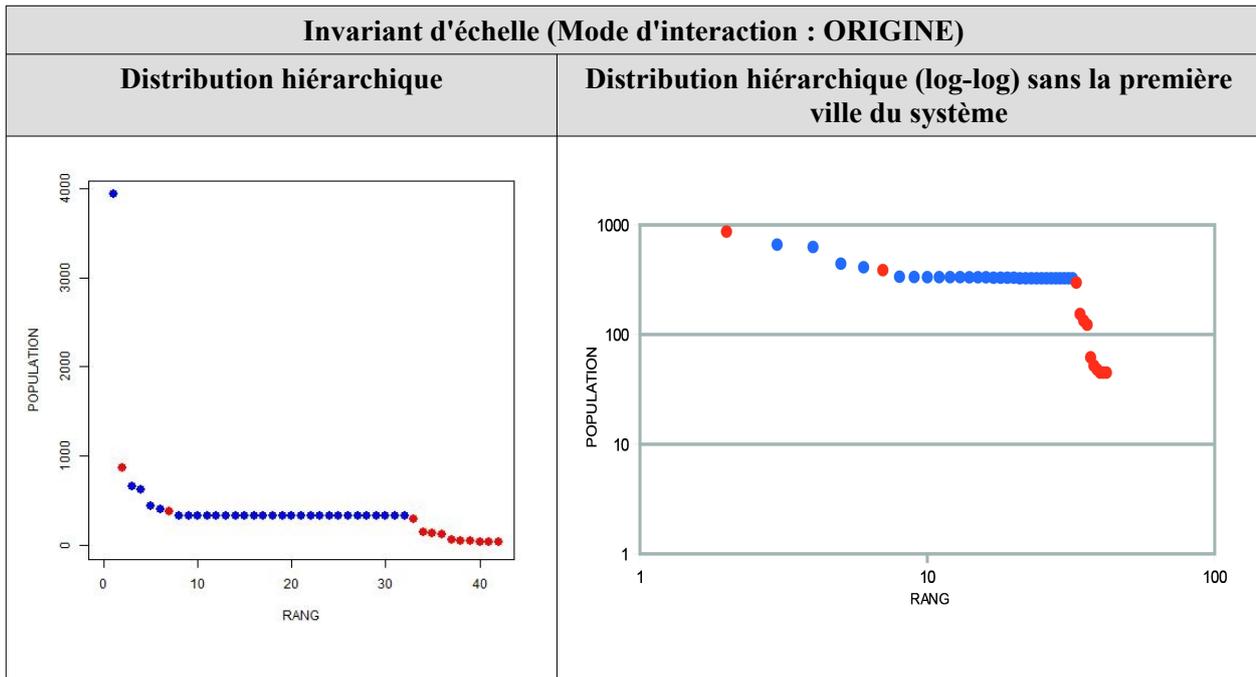


Figure 56: Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour le réseau Invariant d'échelle (migration: 1%, seuil émergence 7%, mode d'interaction ORIGINE, Probabilité d'émergence nouvelle d'arcs : nulle)

La majorité des nouvelles villes ne rattrape pas son retard démographique et forme la queue de la distribution hiérarchique. C'est pour cela que les distributions se rapprochent des structures hiérarchiques de type rang-taille, sans pour autant correspondre à sa définition statistique. Toutes les hiérarchies obtenues ont désormais une ou plusieurs grandes villes et une queue composée de nombreuses petites villes qui ajustent par le bas la distribution vers une rang-taille.

Les figures ci-dessus montrent que, si majoritairement les nouvelles villes restent sous l'influence et l'attraction des villes initiales et ne parviennent pas à rattraper leur retard démographique, certaines y parviennent tout de même. Les analyses qui suivent se focalisent sur ces villes pour tenter de mieux les cerner.

La population de base d'une nouvelle ville est fonction du nombre de Marchands qui vont s'y installer. Ce nombre varie selon si cette localisation correspond à un Lieu où beaucoup d'agents Marchands ont fait leur profit-maximal. La population finale d'une nouvelle ville va également dépendre de sa population de base et de sa participation aux interactions au cours de la simulation. Une ville qui émerge vers la fin d'une simulation avec une place hiérarchique finale élevée sera alors expliquée par sa population de base et non par sa capacité à capter les flux migratoires en cours de simulation.

Pour mieux connaître la trajectoire des villes émergentes devenues grandes, nous avons relevé pour chaque simulation, le nombre de villes émergentes parmi les cinq plus grandes du système urbain final (le « top 5 ») (cf. Annexe E). Nous regroupons les simulations par topologie de réseau et selon la probabilité d'émergence d'un nouvel arc (quatre simulations avec le mode d'interaction ALL et quatre simulations avec le mode d'interaction ORIGINE). Par topologie de réseau, on dispose alors de l'information de huit « top 5 » soit 40 villes. Plus le nombre de nouvelles villes dans le « top 5 » est élevé, plus cela démontre une capacité du système à faire émerger des villes performantes dans les interactions.

Les résultats mettent en évidence deux points :

1- Tous les réseaux de transport modélisés, alors qu'ils n'offrent pas les mêmes potentiels d'interaction, permettent à certaines nouvelles villes de se retrouver en position dominante dans la hiérarchie finale. Pour chaque topologie de réseau, le nombre total de villes émergentes figurant dans le « top 5 » est compris entre 12 et 19 soit entre un tiers et la moitié des 40 possibles. Chaque structure spatiale laisse donc une possibilité variable aux nouvelles villes de se développer.

2- La création d'un nouvel arc qui accompagne l'émergence d'une nouvelle ville favorise sa croissance.

Les simulations avec une probabilité de 50% d'avoir des nouveaux arcs connectés à chaque nouvelle ville permettent d'augmenter légèrement le nombre de ces villes dans le « top 5 ». Les nouveaux arcs leur confèrent un meilleur potentiel d'interaction en redessinant les plus courts chemins, ce qui est particulièrement vrai pour les réseaux Small world et SW qui sont sensibles à ce processus.

Probabilité d'émergence de nouveaux arcs	Réseau Invariant d'échelle	Réseau Manhattan	Réseau small world	Réseau SW
Nulle	13/40	16/40	14/40	12/40
50%	15/40	10/40	19/40	18/40

Tableau 34: Le nombre de villes dans le « top 5 » (pour un maximum de 40) pour 8 simulations selon la probabilité d'émergence de nouveaux arcs et le réseau modélisé

Étudier le nombre de nouvelles villes dans le « top 5 » ne suffit pas à comprendre qui sont ces nouvelles villes et comment elles y parviennent. Dans cette perspective, nous avons relevé les identifiants de chaque ville émergente du « top 5 », sachant que l'identifiant 31 correspond à l'identifiant de la première ville émergente, puisqu'à l'état initial le système est composé de 30 villes. Une ville avec un identifiant proche de 31 fait donc partie des premières villes à émerger. Si elle est au sommet de la hiérarchie, ce n'est donc pas en ayant attiré à elle beaucoup d'agents Marchands en fin de simulation, mais c'est en ayant, tout au long de la simulation, su tirer bénéfice de ses interactions afin d'être attractive et combler son retard démographique sur les villes initiales. L'étude de l'identifiant des villes du « top 5 » permet aussi de distinguer si de nouvelles villes sont régulièrement présentes au sommet de la hiérarchie.

Tout d'abord, au vu du tableau Tableau 35, les identifiants des villes émergentes du « top 5 » sont variés. Ce ne sont pas forcément toujours les mêmes villes qui dominent la hiérarchie urbaine. Pourtant, on remarque des identifiants récurrents selon les réseaux modélisés. Pour le réseau Invariant d'échelle, les identifiants 36 et 40 sont régulièrement dans le « top 5 » avec le mode d'interaction ORIGINE. Pour le réseau Small world, c'est la ville 35 qui est régulièrement dans le « top 5 », tandis que pour le réseau SW c'est la ville 33. Enfin, pour le réseau de Manhattan, les identifiants 33 et 34 sont régulièrement au sommet de la hiérarchie. Ces identifiants, proches du nombre 31, renvoient donc à des villes émergeant parmi les premières.

Un identifiant qui se répète pour une même topologie de réseau correspond à une ville qui a émergé au même moment de la simulation. La dynamique temporelle et spatiale d'émergence des villes étant influencée par le réseau de transport, les localisations de ces villes sont alors les mêmes. C'est donc bien la localisation des villes et leur contribution aux interactions globales qui leur permettent de se démarquer en termes de population finale.

Paramètres	Réseau Invariant d'échelle		Réseau Manhattan		Réseau small world		Réseau SW	
	Probabilité nulle d'émergence nouvelle d'arcs							
	Mode d'interaction : ALL							
	Id	Id max	Id	Id max	Id	Id max	Id	Id max
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	47 / 52	55	33 / 37 / 38	43	42	44	57	62
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	54	56	36 / 43 / 57	60	35 / 40	43	-	43
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	39 / 48	55	37 / 38	41	38 / 41	44	46 / 66 / 70	74
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	42 / 49 / 50	59	35 / 41 / 44	45	35 / 36	38	45	53
	Mode d'interaction : ORIGINE							
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	42	42	34	35	35 / 41	46	33 / 43	44
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	40	40	34	35	35 / 41	46	33	42
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	39 / 40	40	34	35	39	47	33 / 42	43
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	40	40	34	35	38 / 40	47	33 / 35	42
	Probabilité de 50% d'émergence nouvelle d'arcs							
	Mode d'interaction : ALL							
	Id	Id max	Id	Id max	Id	Id max	Id	Id max
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	48 / 53	58	34	36	35 /38 /44/ 45	45	46 / 47 / 49 / 57	58
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	43	47	32 / 34 / 35 / 38	38	48	48	46	48
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	40 / 42 / 50	52	34 / 37	37	40 / 43 / 46	48	36 / 41 / 51 / 52	57
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	37 / 42 / 45	47	34	36	39 / 46	47	44	52
	Mode d'interaction : ORIGINE							
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	40	41	33	33	35 / 40	46	33 / 44	44
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	36	40	-	37	35 / 40	45	33 / 34	42
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	36 / 40	40	-	34	37 / 41	46	33 / 42	43
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	36	40	33	34	35 / 39 / 40	47	35 / 38	42

Tableau 35: Identifiant des villes émergentes du « top 5 »

Pour conclure, les villes qui émergent en cours de simulation peuvent, selon leur localisation, bénéficier d'une bonne croissance urbaine en ayant de nombreuses interactions, certaines pouvant même être suffisamment attractives pour être au sommet de la hiérarchie urbaine. Cependant, comme évoqué précédemment (cf. 2.3.4), la structure hiérarchique des villes est résistante au changement de topologie et seul un changement radical de topologie ou d'impédance peut la modifier. ***Les villes initiales gardent donc globalement un avantage compétitif initial qui perdure dans le temps tandis que les nouvelles villes vont majoritairement former la queue de la distribution hiérarchique.***

Il existe donc une certaine inertie spatiale où la distribution de la population reste concentrée dans quelques villes initiales.

Enfin, le système de villes est impacté par le processus d'émergence de nouvelles villes. ***Les hiérarchies urbaines convergent, quel que soit le type de réseau, vers une structure « unique » caractérisée par une distribution hiérarchique s'avoisinant à un type rang-taille***, sans pour autant correspondre à sa description statistique théorique.

On a vu que, peu importe les paramètres de modélisation, on assiste toujours à l'émergence de nouvelles villes. Ce sont les paramètres liés aux conditions d'interaction qui vont le plus influencer l'intensité de l'émergence. Les conséquences sur les distributions hiérarchiques sont diverses. Il y a une convergence des hiérarchies vers une structure semblable (peu de très grandes villes, quelques moyennes et beaucoup de très petites villes). Ensuite, l'écart avec la loi rang-taille diminue. Ce sont les nouvelles villes qui participent à cette convergence des structures hiérarchiques. Elles émergent avec une population plus petite que les villes initiales et ont majoritairement des difficultés à rattraper ce retard démographique. Elles forment alors la queue de la distribution hiérarchique.

Il existe donc bel et bien toujours une émergence de villes qui a des conséquences statistiques sur la hiérarchie urbaine. Il nous reste alors à savoir où et quand se produit cette émergence.

### **3.4.6 La compréhension de la dynamique spatio-temporelle de l'émergence des villes comme élément de compréhension de l'uniformisation des structures hiérarchiques**

Nous venons de voir en quoi le système de villes se trouve impacté suite à l'émergence des nouvelles villes. L'étude des caractéristiques spatiales de l'émergence des nouvelles villes doit éclairer la dynamique spatio-temporelle de l'émergence des villes afin de comprendre les logiques d'évolution du système de villes. Pour comprendre comment celles-ci impactent la structure spatiale et hiérarchique du système de villes, il faut étudier les caractéristiques spatiales (où et à côté de qui ?) et temporelles (quand ?) de chaque nouvelle ville.

Il s'agira tout d'abord d'étudier la répartition spatiale « générale » des nouvelles villes sur l'ensemble du système de villes (concentré ou non). Leur émergence a-t-elle pour conséquence de renforcer le potentiel d'interaction et l'attractivité des villes initiales les plus dynamiques qui vont voir leur position renforcée dans une logique de *path dependency* (Sanders, 2014) ?

Afin de faire face à la multitude des configurations spatiales résultantes des différentes simulations, nous procédons à une Classification Ascendante Hiérarchique. C'est à travers cette classification que nous pourrons comprendre l'aspect spatial de l'émergence des villes. Nous entrons alors dans une démarche *bottom up*, car en comprenant les logiques spécifiques de l'émergence de chaque ville et en tirant une synthèse, nous serons alors en mesure d'expliquer l'évolution générale du système en comprenant les mécanismes qui l'influencent.

### 3.4.6.1 Une relative concentration des villes émergentes

Pour apporter des éléments de réponse à la compréhension des logiques de localisation de ces nouvelles villes et à l'influence de leur émergence sur la nature des systèmes de villes et des réseaux de transport, il faut étudier la répartition spatiale de ces villes. Deux points sont à étudier : la localisation des villes émergentes entre elles et la localisation des villes émergentes par rapport aux villes initiales. Le processus d'émergence se fait-il uniformément sur l'ensemble du système ou bien se trouve-t-il concentré autour de quelques villes attractives formant ainsi des « noyaux » urbains ? Pour le savoir, nous étudions plusieurs distances moyennes finales :

- La distance moyenne entre les villes émergentes. Des valeurs faibles renvoient à une concentration spatiale des nouvelles villes,
- La distance moyenne entre une ville émergente et la ville initiale la plus proche. Une moyenne faible renvoie alors à des villes qui émergent à proximité des villes initiales.

Donc, si les valeurs sont faibles pour ces deux moyennes cela signifierait que les nouvelles villes forment des concentrations urbaines à proximité des villes déjà existantes créant ainsi des « noyaux urbains », comme illustré ci-dessous.

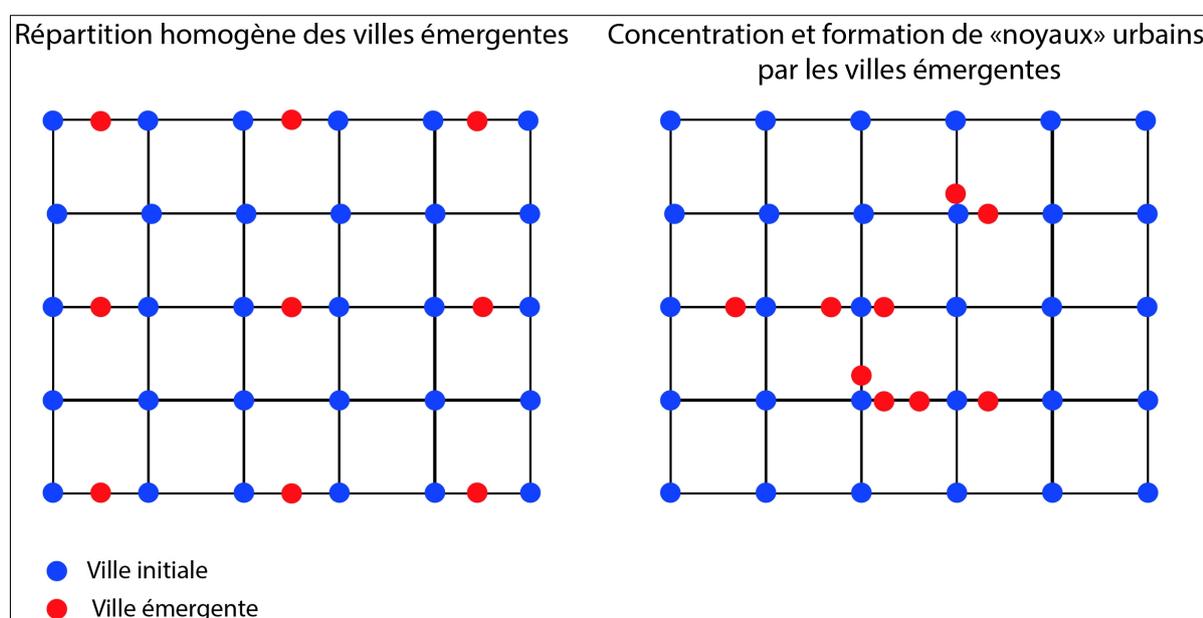


Figure 57: Schématisation de la différence entre émergence homogène ou concentrée des villes émergentes

Commençons par étudier la localisation des villes émergentes entre elles. Le Tableau 36 ci-dessous illustre une localisation des nouvelles villes qui ne se fait pas sur l'ensemble du réseau. Les distances moyennes entre les villes émergentes sont strictement inférieures à celles des distances moyennes initiales ce qui traduit un regroupement de ces villes dans l'espace.

Les réseaux Invariant d'échelle et SW semblent conditionner une localisation relativement concentrée des nouvelles villes avec des distances moyennes respectives de 19.4 et de 19.1 par rapport aux distances moyennes initiales respectivement de 34 et 25. Les villes émergentes sont plus proches les unes des autres que ne le sont les villes initiales. Il y a alors une concentration spatiale et un regroupement des villes émergentes au sein du système de villes.

Ensuite, les nouvelles villes émergent majoritairement à proximité d'une ville initiale. Les topologies de réseau modélisées entraînent une proximité des nouvelles villes avec les villes

initiales avec des distances moyennes, entre une ville émergente et une ville initiale, comprises entre 1.7 et 3.5 alors que la longueur moyenne des arcs est comprise entre 8 et 18.

Réseau	Distance moyenne initiale	Distance moyenne finale	Distance moyenne entre les villes émergentes			Longueur moyenne des arcs	Distance moyenne entre une ville émergente et la ville initiale la plus proche		
			Min	Max	Moyenne		Min	Max	Moyenne
Invariant d'échelle	34	5	6.4	28.1	19.4	8	1.6	2.1	1.8
Manhattan	63	13.5	34.1	49.1	39.7	18	1	5.2	3.5
Small world	35	10.5	16.1	33.4	25	13.7	1.6	2.1	1.7
SW	25	12.5	9.3	23.3	19.1	14.3	1.4	2.7	1.8

Tableau 36: Les distances (en Lieux) moyennes entre villes émergentes et avec les villes initiales les plus proches

Nous remarquons un regroupement spatial des villes qui conduit à une densification urbaine puisque, premièrement les nouvelles villes émergent proches les unes des autres, deuxièmement, les nouvelles villes émergent à proximité des villes initiales. Le nombre de nouvelles villes et leur concentration à proximité des villes initiales conduit à une réduction significative des distances moyennes finales, notamment pour le réseau Invariant d'échelle et de Manhattan.

**Ces résultats montrent la naissance de la dynamique de densification urbaine et la logique spatiale de la « métropolisation » : le territoire s'organise autour de quelques grandes villes dynamiques.** La métropolisation est définie comme « la concentration de valeur à l'intérieur et autour des villes les plus importantes » d'après le *Dictionnaire de la Géographie et de l'espace des sociétés* (Levy, Lussault, 2013). Ce constat reste néanmoins à relativiser : même si une concentration spatiale des villes apparaît, ce n'est pas pour autant le cas de la population. Cette densification urbaine n'est pas identique selon le réseau qui va conditionner cette dynamique. Les réseaux Invariant d'échelle et SW sont propices à la concentration spatiale des nouvelles villes autour des villes les plus attractives. À l'inverse, le réseau de Manhattan est moins concerné par la dynamique de densification urbaine.

### 3.4.6.2 Les effets de l'émergence sur les villes initiales

Les villes émergentes empêchent-elles le développement des villes initiales à proximité en limitant leur croissance ou à l'inverse renforcent-elles leur potentiel d'interaction ? Comme étudié précédemment, les nouvelles villes restent sous l'influence de l'attraction des villes initiales et ont du mal à rattraper leur retard démographique. De plus, elles émergent à proximité des villes initiales.

Nous avons étudié l'évolution du potentiel d'interaction global des villes initiales avant et après l'émergence des nouvelles villes, tout en étudiant le potentiel global de ces dernières. L'objectif est de savoir si les nouvelles villes ont impacté positivement ou négativement les villes initiales.

Pour chaque simulation, il a été calculé la moyenne des trois indicateurs que sont la *Betweenness* (l'intermédiarité), l'*Eigenvector centrality* (l'influence de chaque ville dans le réseau) et la *Closeness centrality* (l'accessibilité) pour les villes initiales (au début et en fin de simulation) et

pour les nouvelles villes. Ainsi, on pourra savoir comment évolue le potentiel d'interaction global des villes initiales et comment s'insèrent les nouvelles villes dans le système de villes.

Obtenir la moyenne de chaque indicateur des villes initiales pour chaque topologie modélisée va servir à réaliser une échelle de comparaison avec les moyennes de fin de simulation. En comparant l'évolution des moyennes pour les villes initiales on sera en capacité de savoir si elles ont globalement perdu une part de leur « capital spatial ».

Réseaux	Invariant d'échelle	Manhattan	Small world	SW
Betweenness	3	4,9	10,6	11,6
Closeness centrality	15	7	15,5	15,5
Eigenvector centrality	14,7	4,7	14,9	14,6

Tableau 37: Moyenne initiale de chaque indicateur par réseau

L'émergence des villes ne répond pas aux mêmes logiques spatiales selon la topologie du réseau. Il semble peu probable que la localisation des nouvelles villes diminue le potentiel des villes ayant les meilleurs potentiels d'interaction dans un réseau Invariant d'échelle.

Les nouvelles villes renforcent le potentiel d'interaction global des villes initiales (cf. Annexe F) pour toutes les topologies modélisées.

Pour le réseau Invariant d'échelle, au regard des moyennes à la fin de chaque simulation, on constate un renforcement global de l'intermédiation et de l'accessibilité des villes initiales. La moyenne de la *betweenness* fait le double de celles des villes émergentes, la moyenne de la *closeness* est toujours strictement supérieure pour les villes initiales.

Concernant le réseau de Manhattan, les villes initiales ont vu leur influence sur le réseau se renforcer avec un accroissement de la moyenne d'*eigenvector centrality*. Leur centralité et leur accessibilité ont également augmenté, mais restent moindres par rapport à celles des nouvelles villes.

Enfin, les villes initiales du réseau Small world connaissent un renforcement de leur « capital spatial » avec une plus grande influence sur le réseau que les nouvelles villes, mais ce sont les nouvelles villes qui ont une plus grande accessibilité. Le constat est le même pour le réseau SW pour qui la seule différence est dans l'écart plus prononcé d'une meilleure intermédiation pour les villes initiales lorsqu'il y a émergence de nouveaux arcs.

Paramètres	Invariant d'échelle	Manhattan	Small world	SW
Catégories	Moyenne			
Betweenness villes de départ	9	18	17	20
Betweenness villes nouvelles	3	23	19	27
Closeness villes de départ	27	18	19	21
Closeness villes nouvelles	16	22	26	28
Eigenvector centrality villes de départ	23	23	27	32
Eigenvector centrality villes nouvelles	24	7	14	13

Tableau 38 : Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (en rouge : les plus fortes moyennes)

Dans tous les cas, les villes initiales ont de meilleurs potentiels d'interaction qu'à l'état initial. Les nouvelles villes ont globalement une meilleure intermédiation et accessibilité que les villes initiales, hormis pour le réseau Invariant d'échelle. Cependant, avec de fortes moyennes d'*eigenvector centrality*, les villes initiales ont le plus d'influence sur le système de villes, car elles sont connectées aux villes ayant les meilleurs potentiels d'interaction. Comme les villes initiales ont une plus forte attractivité que les nouvelles villes, lorsqu'elles émergent, elles bénéficient de la proximité de ces nouvelles villes tout en gardant et renforçant leur attractivité propre sur le système de villes.

Une nouvelle ville, par sa localisation, renforce donc l'attractivité des villes initiales, mais améliore aussi le potentiel d'interaction global du système. Les nouvelles villes ne font que renforcer l'inégalité de potentiel d'interaction puisqu'elles participent à la densification urbaine du système de villes par la concentration de nouvelles villes à proximité des villes initiales.

L'étude des moyennes des indicateurs permet de conclure que les nouvelles villes ont un profil spatial distinct de celui des villes initiales. Les réseaux de transport modélisés ne vont pas induire les mêmes logiques de localisation. Certains vont faire émerger des villes avec des localisations plus ou moins intermédiaires et/ou accessibles. Ces logiques sont fonction de la topologie du réseau en question, mais globalement ces nouvelles villes ne font que renforcer l'attractivité des villes initiales.

Afin de comprendre cette dynamique d'émergence, il faut étudier les caractéristiques spatio-temporelles de l'émergence des nouvelles villes. Le système de villes est un système complexe qui est sensible à l'émergence de nouvelles entités et aux changements d'organisation de ces mêmes éléments qui impactent l'interaction. Les nouvelles villes vont avoir un impact sur l'interaction globale du système et renforcent l'attractivité de chaque ville et renforçant l'intensité des interactions sur quelques axes majeurs.

### 3.4.6.3 Une typologie des villes selon leur logique d'émergence

Pour comprendre les logiques d'émergence, nous avons étudié certaines caractéristiques des nouvelles villes, notamment leur proximité avec certaines villes initiales remarquables par leur

localisation ou potentiel d'interaction (les plus accessibles, centrales, etc.). Les questions posées sont : à côté de qui une ville émerge-t-elle ? Quand cela se produit-il ? N'oublions pas qu'une ville émerge sur des arcs qui connectent deux autres villes, il faut alors porter une attention toute particulière au voisinage direct de chaque nouvelle ville. Pour répondre à ces questions, plusieurs traitements ont été effectués.

Tout d'abord, nous avons étudié le système de villes à l'état initial afin de connaître quels sont les indices *betweenness*, *closeness*, *eigenvector centrality* pour chaque ville. Pour chaque indice, nous retenons les trois meilleures villes. Ensuite, pour l'état final du réseau, nous récupérons les dix villes qui sont sur le plus grand nombre de plus courts chemins que nous nommerons ici les villes « intermédiaires ».

Puis, pour chaque nouvelle ville, nous regardons qui sont ses trois voisines les plus proches en distance topologique. Le nombre de trois est retenu, car une ville qui émerge ne peut pas avoir plus de trois connexions directes, les deux villes de l'arc sur lequel elle émerge et éventuellement la ville qu'elle connecte s'il y a émergence d'un arc supplémentaire. Pour chaque nouvelle ville, nous recherchons combien dans ses trois plus proches voisines sont :

1. des villes initiales ayant les meilleurs indices,
2. des villes « intermédiaires »,
3. d'autres villes émergentes,
4. puis, pour la ville émergente, nous comptons le nombre de plus courts chemins qui passent par elle afin de compléter l'étude de leur profil et localisation relative.

On effectue une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), reposant sur le critère de Ward, afin de regrouper les nouvelles villes en fonction des critères cités. Ainsi, une typologie des villes nouvelles pourra être mise en valeur par l'étude de leur voisinage.

Pour chaque réseau modélisé, nous rassemblons les résultats afin d'obtenir quatre groupes qui concernent les simulations :

1. avec une probabilité nulle d'émergence de nouveaux arcs et un mode d'interaction ALL,
2. avec une probabilité nulle d'émergence de nouveaux arcs et un mode d'interaction ORIGINE,
3. avec une probabilité d'émergence de nouveaux arcs de 50% (coévolution avec le réseau de transport) et un mode d'interaction ALL,
4. avec une probabilité d'émergence de nouveaux arcs de 50% (coévolution avec le réseau de transport) et un mode d'interaction ORIGINE.

Afin de faciliter la comparaison et l'étude des logiques d'émergence des villes, nous avons opté pour une standardisation des résultats à trois classes. Nous avons quantifié la force discriminante de chaque variable sur la classification, ce qui permet de déterminer les caractéristiques les plus discriminantes. Plus une variable a une force discriminante élevée, plus elle détermine l'appartenance de chaque individu statistique à une classe. Ces variables définissent et caractérisent alors le profil des classes, car plus un critère traduit une proportion de variance inter-classe élevée plus il est discriminant. Si sa proportion est de 100, c'est que le critère peut être totalement absent d'une classe quand il est omniprésent pour une autre. Pour chacune des classes obtenues, on a compté le nombre de villes concernées.

Les caractéristiques de chaque réseau donnent des résultats différents lors des CAH. Certaines villes voisines d'une ville émergente peuvent tout aussi bien être des villes ayant de très bons indicateurs de centralité et d'accessibilité et être sur de nombreux plus courts chemins. C'est le

cas par exemple du réseau Invariant d'échelle où les villes au cœur du réseau cumulent plusieurs caractéristiques. Donc, une même ville peut être comptabilisée plusieurs fois ce qui rend la classification des villes par l'étude de leur voisinage moins lisible. Il existe toutefois des récurrences et des logiques de localisation que l'étude du voisinage des nouvelles villes met en évidence.

Les classes créées via les CAH mettent en exergue des profils de villes en fonction de caractéristiques spatio-temporelles différentes qui vont alors renseigner sur les logiques d'émergence.

On relève la présence de trois classes. Afin de pouvoir les identifier sur les tableaux ci-dessous, un code couleur a été utilisé :

1. Une classe dans laquelle on trouve les villes qui sont caractérisées par une proximité avec les villes initiales qui ont les meilleurs indicateurs de *betweenness*, *closeness*, *eigenvector centrality* (code couleur : jaune). C'est la classe à laquelle le moins de villes appartient.
2. Une classe dans laquelle on trouve des villes qui se caractérisent par la proximité aux autres villes émergentes (code couleur : bleu). Le nombre élevé de villes dans cette classe confirme la concentration des nouvelles villes entre elles.
3. Enfin, une classe définie par l'association des variables « proximité aux villes intermédiaires » et « nombre de plus courts chemins ». (code couleur : vert).

La topologie de chaque réseau influence le voisinage et la dynamique d'émergence ce qui fait qu'une même ville peut autant être à proximité des autres villes émergentes qu'à proximité des villes intermédiaires et sur de nombreux plus courts chemins puisqu'une ville voisine peut aussi bien être une autre ville émergente qu'une ville intermédiaire.

Émergence	Nulle				Nulle				50%				50%			
	ALL				ORIGINE				ALL				ORIGINE			
Mode d'interaction																
Groupe	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%
Betweenness	0	1	0	92	0	0	1	100	0.9	0	0	74	0	0	0	0
Closeness	0	1	0	92	0	0	1	100	0.9	0	0	74	0	0	0	0
Eigenvector centrality	1	0.3	0	62	0.3	1	0	20	0.6	0.4	0	19	0.6	0.2	1	21
Voisins émergents	0,3	0.4	0,9	12	0.4	1	0	14	0.4	0,1	1,2	55	1	0	1	100
Nb court chemin	130	292	138	12	42	148	39	84	281	61	97	28	51	52	354	74
Villes intermédiaires	0.2	2.3	0,2	62	0.7	0	1	20	1.5	1,1	0	37	0.5	1,8	0	34
Totale ville	15	25	65		36	4	2		12	46	26		12	27	2	

Tableau 39: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Invariant d'échelle).  
% = proportion variance expliquée

Émergence	Nulle				Nulle				50%				50%			
Mode d'interaction	ALL				ORIGINE				ALL				ORIGINE			
Groupe	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%
Betweenness	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0	1	100
Closeness	0	0	1.3	66	0	0	1	100	0	0	1	50	0/3	0	0	27
Eigenvector centrality	0	0	0.6	21	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0
Voisin émergent	2.7	1.8	1	26	0.6	3	1	94	2.3	1.2	1	60	0	0.3	0	16
Nb court chemin	465	198	110	51	111	94	98	6	246	117	124	20	119	70	119	96
Villes intermédiaires	1.4	0.3	0.6	39	1.4	0.2	1	39	1.7	1	1.5	15	3	1.8	3	54
Totale ville	44	97	3		10	20	2		40	30	2		3	7	1	

Tableau 40: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Manhattan).  
% = proportion variance expliquée

Émergence	Nulle				Nulle				50%				50%			
Mode d'interaction	ALL				ORIGINE				ALL				ORIGINE			
Groupe	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%
Betweenness	0	0	1	100	0	0	1	100	0	0	0.4	17	0	0	0	0
Closeness	0	0	1	25	0	0	0	8	0	0.4	0	28	0.2	0	0	11
Eigenvector centrality	0.2	0	0	9	0	0	0	5	0	0	1	100	0	0	1	100
Voisin émergent	1	2	0	35	1.4	2	0	32	1.2	2	1.4	22	2	1.3	2	17
Nb court chemin	94	171	63	77	134	99	73	40	117	218	170	23	99	239	93	56
Villes intermédiaires	0.3	2	0.5	52	1	0	0	90	0.4	2	0.4	51	0.3	1.5	1.7	48
Totale ville	34	13	2		36	29	1		30	28	10		36	24	4	

Tableau 41: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Small world).  
% = proportion variance expliquée

Émergence	Nulle				Nulle				50%				50%			
Mode d'interaction	ALL				ORIGINE				ALL				ORIGINE			
Groupe	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%	1	2	3	%
Betweenness	0.7	0	1	60	0	1	0	100	1	0	1	10	0	1	0	100
Closeness	0.7	0	0	43	0	0	1	100	0.1	0	0	2.2	1	0	1	100
Eigenvector centrality	0	0	1	100	0	1	0	100	0	0	1	100	0	1	0	100
Voisin émergent	1.1	1.6	0.5	16	1.4	0.8	0.8	16	1,7	2,6	1	22	1.3	0.8	0.8	16
Nb court chemin	170	171	66	2	46	65	94	26	164	485	77	49	94	77	153	20
Villes intermédiaires	1.7	0.5	1	42	0.9	1	2.1	40	0.8	2.6	0	46	0.8	1	1.9	29
Totale ville	29	81	2		35	5	11		80	14	1		34	5	12	

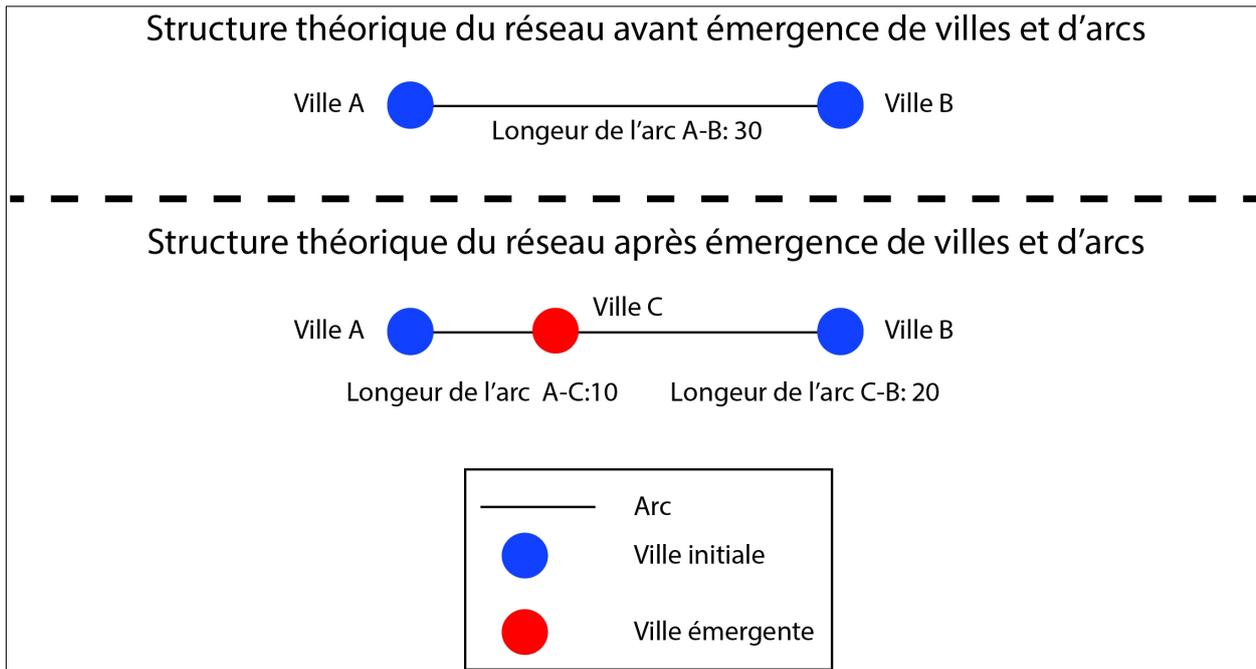
Tableau 42: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau SW).  
% = proportion variance expliquée

Les résultats des CAH ont permis d'identifier plusieurs typologies de villes émergentes qui renvoient à des logiques d'émergence spatio-temporelles différentes. Elles vont aider à saisir et décomposer spatialement et temporellement la dynamique d'émergence des villes (à côté de qui et quand émerge une ville ?). Ainsi, les typologies obtenues vont permettre de passer d'une étude de l'émergence d'un niveau global à local.

Les profils obtenus ne trouvent une explication qu'en les replaçant dans le processus d'émergence des villes dans une dynamique temporelle. L'émergence de toutes les villes n'est pas simultanée et se fait progressivement. Chaque nouvelle ville va influencer la logique de localisation des villes suivantes. Une décomposition temporelle du processus d'émergence permet de comprendre les différences notables et inégales du nombre de villes présentes dans chaque classe et leurs caractéristiques :

#### 1. Phase 1 de la « métropolisation » : les premières villes à émerger et la naissance des foyers d'interaction

Les premières villes à émerger vont avoir deux conséquences sur l'interaction. Premièrement, elles vont permettre à leurs plus proches voisins d'avoir un nouveau partenaire à une distance réduite. Lorsqu'une ville émerge, elle segmente l'arc en deux parties plus petites ce qui facilite l'interaction avec les deux villes à proximité puisque la distance se réduit entre elles. Par exemple, on échange plus souvent sur la même période de temps donnée avec une ville à 10 km qu'avec une ville à 30 km puisque cela nécessite moins de temps pour y parvenir. Deuxièmement, les nouvelles villes peuvent réduire les plus courts chemins et modifier leur tracé quand elles créent un nouvel arc à destination d'une ville attractive voisine. Les conséquences peuvent être bénéfiques pour elles et leur voisinage.



*Figure 58: Réduction de la longueur des arcs qui accompagnent l'émergence d'une nouvelle ville*

Pour faire simple, les premières villes à émerger peuvent rapidement conférer des avantages indéniables à leurs voisines en augmentant leur potentiel d'interaction, leur attractivité et, sur le long terme, leur croissance. Elles conditionnent alors une partie de l'interaction en participant à la création de « foyers d'interaction » attractifs qui correspondent aux noyaux urbains. La localisation des premières villes se fait sur les arcs où l'intensité des interactions est la plus forte dès le départ. Cela correspond aux arcs par lesquels passent les plus courts chemins qui connectent directement ou indirectement les villes ayant les meilleurs indicateurs de centralité et d'accessibilité. L'émergence des premières villes à proximité des villes les plus influentes permet de réduire la distance entre elles et de favoriser l'interaction.

C'est une boucle de rétroaction positive de la densification urbaine et de la « métropolisation », car l'émergence des nouvelles villes renforce l'attraction des villes voisines et l'intensité de l'interaction, ce qui favorise à son tour le processus d'émergence de nouvelles villes à proximité.

## 2. Phase 2 de la « métropolisation » : l'émergence en « grappe »

Les villes suivantes à émerger vont se trouver à proximité des foyers attractifs formés par les premières villes à avoir émergé, ce qui a pour conséquence la formation de « noyaux » urbains. C'est ce que nous nommerons le processus d'émergence en « grappe », car les nouvelles villes émergentes se trouvent à proximité des précédentes. L'émergence en « grappe » traduit la dynamique de densification urbaine et de « métropolisation » : le territoire s'organise autour de quelques grandes villes dynamiques.

## 3. Phase 3 de la « métropolisation » : L'émergence des villes « étapes »

Les foyers attractifs influencent les flux d'interaction en attirant à eux les Marchands de l'ensemble du système de villes. C'est pour cette raison que les villes émergent principalement sur des arcs par lesquels passent de nombreux plus courts chemins ou à proximité des villes « intermédiaires ». Les villes et arcs intermédiaires permettent de joindre les villes périphériques

et éloignées des principaux foyers attractifs. Les flux convergent vers ces arcs et l'interaction s'y produit avec les Marchands qui y transitent. Les villes qui émergent sont alors des villes « étapes » qui vont offrir la possibilité de réduire les distances entre les villes périphériques et les foyers attractifs pour échanger.

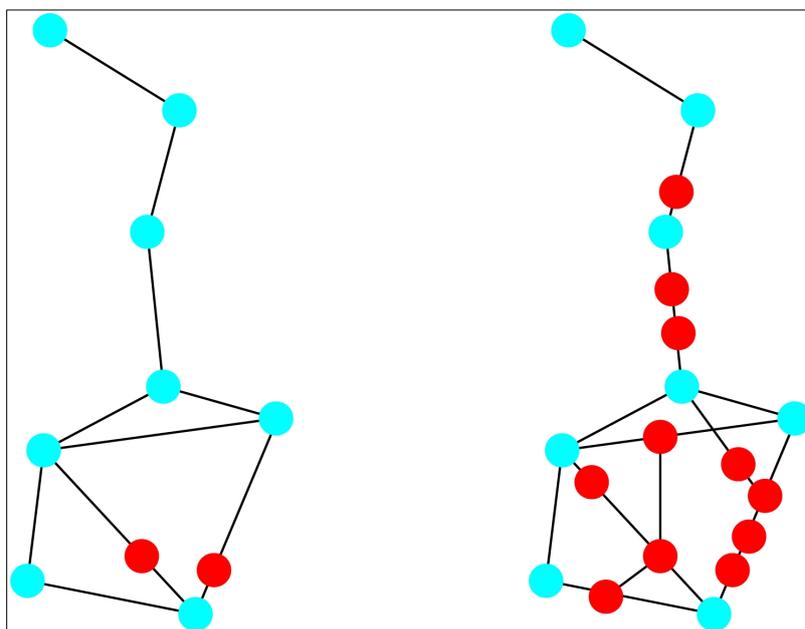


Figure 59: Schématisation du regroupement en « grappe » autour du foyer attractif et émergence des villes « étapes »  
(en bleu les villes initiales, en rouge les nouvelles villes)

La dynamique spatio-temporelle de l'émergence des villes peut donc se résumer en plusieurs étapes :

- l'émergence des premières villes à proximité des grandes villes attractives qui créent les premiers grands foyers attractifs de l'interaction. Ces villes vont conditionner la localisation des futures villes (phase 1 de la « métropolisation »). Les nouvelles villes impactent les directions et l'intensité des flux d'interaction en les faisant converger vers quelques foyers de villes attractives.
- la densification urbaine autour et dans les foyers attractifs (phase 2 de la « métropolisation »),
- la localisation ponctuelle de villes servant d'intermédiaires entre des foyers attractifs distants ou avec la périphérie du système.

Désormais, nous voulons savoir comment les paramètres de l'interaction modifient cette dynamique.

#### 3.4.6.4 Une dynamique d'émergence influencée par le réseau de transport

La dynamique d'émergence des nouvelles villes est assez similaire pour toutes les configurations puisque les premières villes qui émergent vont faire apparaître des foyers d'interactions et vont influencer l'émergence en « grappe » qui crée des « noyaux » urbains. Pourtant, les profils et caractéristiques des villes sont plus ou moins marqués selon les configurations initiales (cf.

3.4.6.3). Deux paramètres de l'interaction influencent ces différences : le mode d'interaction entre agents Marchands mais surtout le réseau de transport modélisé.

L'influence du mode d'interaction entre Marchands porte sur le nombre de « grappes » qui va se former. Avec le mode d'interaction ALL, ce nombre est plus important ce qui s'explique par une répartition spatialement homogène des interactions entre Marchands. Le mode d'interaction ORIGINE va à l'inverse concentrer l'interaction et l'émergence des villes sur quelques axes.

Mais, ce qui impacte le plus la dynamique spatio-temporelle de l'émergence est le réseau de transport. Ses caractéristiques vont influencer l'interaction et la concentration des interactions qui peuvent faire varier le nombre final de « noyaux » urbains. Ces différences sont logiquement marquées entre les deux réseaux aux structures opposées : le réseau Invariant d'échelle qui voit l'émergence d'un seul foyer d'attraction formé d'un noyau urbain dense au centre du réseau et, le réseau de Manhattan très homogène.

Rappelons que le réseau Invariant d'échelle est hiérarchisé et structuré autour de quelques villes à forte intermédiarité. C'est pour cette raison qu'il existe une classe de villes émergentes définie par la proximité avec les villes ayant les meilleurs indicateurs de *betweenness* et *closeness*, puisque les premières villes à émerger vont se localiser au centre du réseau. Le centre du réseau devient alors un grand foyer d'attraction qui va influencer les flux en attirant à lui les Marchands de tout le système de villes. La « métropolisation » est en cours et de nouvelles villes vont se greffer dans et autour de ce foyer d'interaction, formant alors un grand noyau urbain par le processus d'émergence en « grappe ». Le réseau Invariant d'échelle va connaître une « métropolisation » de son territoire en un seul lieu qui va dominer le reste du système. Certaines villes ne se situent pas à proximité des autres nouvelles villes, car elles se trouvent isolées sur les arcs permettant aux flux de converger vers le centre. Ce sont les villes « étapes » qui se situent sur les plus courts chemins qui convergent vers le centre attractif ou à proximité des villes « intermédiaires » par lesquels transitent les Marchands pour accéder au centre du réseau. Cette classe est bien représentée dans le réseau Invariant d'échelle.

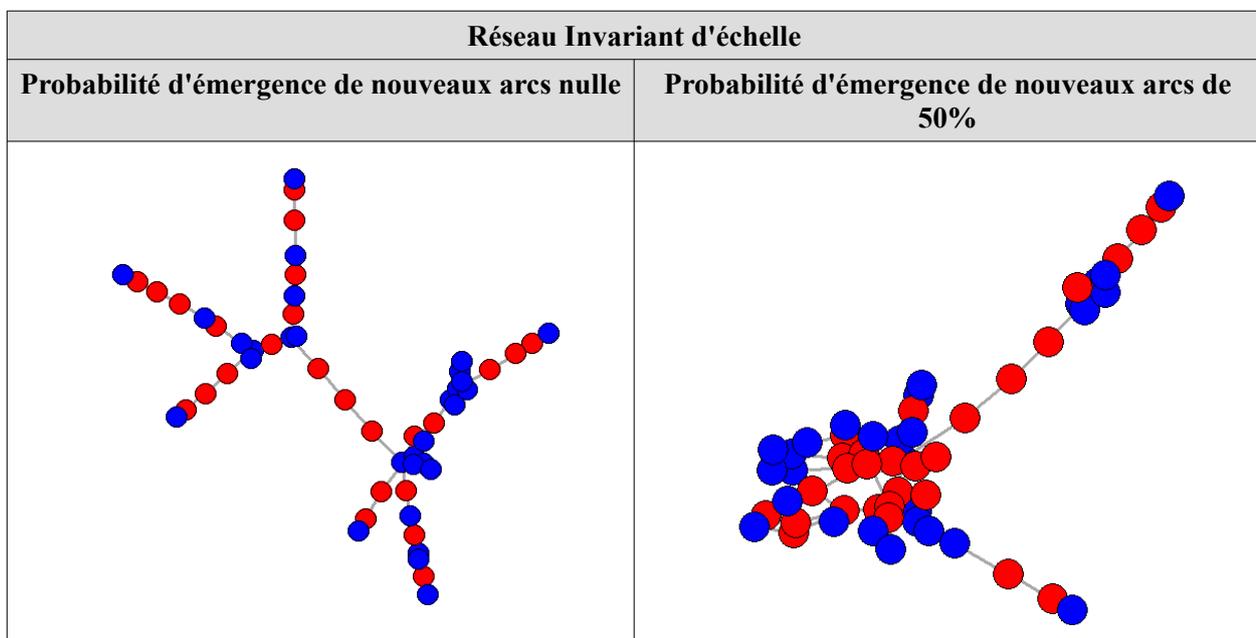


Figure 60: Localisation des villes pour le réseau Invariant d'échelle. En bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes

Le réseau de Manhattan est beaucoup plus homogène puisque chaque ville a un potentiel d'interaction relativement égal. Les premières villes émergentes vont permettre de créer les premiers foyers attractifs vers lesquels vont graviter les interactions et émerger les nouvelles villes créant ainsi un système polycentrique. Les nouvelles villes ont pour caractéristique principale d'être sur de nombreux plus courts chemins, ce qui s'explique par l'homogénéité de la structure du réseau. Dès qu'une nouvelle ville émerge, les arcs n'ont plus tous la même longueur, de nouveau plus courts chemins se forment et créent des inégalités d'accessibilité. La dynamique de « métropolisation » va se faire autour de plusieurs « noyaux » urbains créant ainsi un territoire polycentrique.

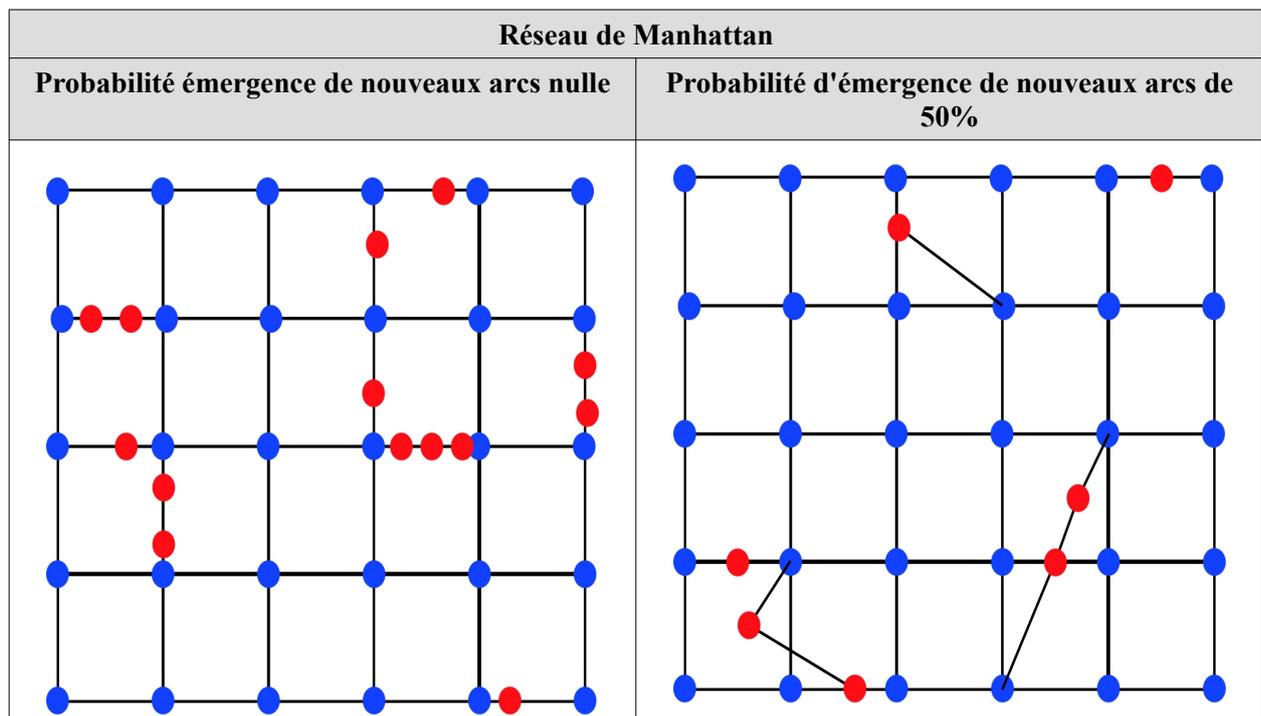


Figure 61: Localisation des villes pour le réseau de Manhattan. En bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes

Chaque réseau de transport possède ses propres caractéristiques. Certains, comme le réseau Invariant d'échelle, offrent des potentiels d'interaction très inégaux et localisés, d'autres, comme le réseau de Manhattan, distribuent plus équitablement les potentiels d'interaction. La conséquence sur la dynamique et la localisation d'émergence des nouvelles villes va être le nombre de « noyaux » urbains qui va émerger avec une plus ou moins forte concentration des nouvelles villes.

Pour conclure, peu importe les paramètres de simulation, on assiste toujours à l'émergence de nouvelles villes au sein du système de villes. Seule l'intensité du processus varie selon deux grands paramètres modélisés que sont le mode d'interaction entre les agents Marchands et la topologie du réseau modélisé.

L'émergence des nouvelles villes a pour conséquence de faire converger les structures des distributions hiérarchiques obtenues des systèmes de villes vers un modèle semblable (peu de très grandes villes, quelques villes de tailles moyennes et beaucoup de petites villes) et ce peu importe les caractéristiques morphofonctionnelles du réseau initial modélisé. Pour autant, aucune

des distributions hiérarchiques ne correspond statistiquement à une logique rang-taille, même si les écarts avec la théorie se réduisent avec l'émergence des nouvelles villes. Le « laisser-faire », qui est l'essence de l'algorithme, favorise la croissance des villes les plus dynamiques du système de villes.

L'émergence des villes n'est pas uniforme spatialement. Les nouvelles villes émergent à proximité des villes initiales les plus dynamiques. De fait, elles vont avoir du mal à rattraper leur retard démographique en subissant l'attraction des villes initiales. L'émergence des nouvelles villes ne fait que renforcer l'inégalité d'interaction et d'attractivité entre les villes (*path dependency*) (Sanders, 2014). Lorsque le réseau évolue par lui-même, sans intervention planifiée, il favorise l'interaction entre les villes dynamiques du système.

On assiste à l'essor de la densification urbaine et d'une dynamique de « métropolisation » du territoire. L'émergence des villes en « grappe », autour des villes initiales attractives, conditionne la localisation des villes suivantes. Le territoire se structure par et pour les métropoles naissantes.

Qu'en dire géographiquement ? Au regard de ces analyses, la « métropolisation » constatée empiriquement peut apparaître comme le fait d'une absence de politique planifiée sur le long terme. Une politique d'aménagement permettrait par exemple, via des investissements massifs dans les réseaux de transport ne répondant pas à une logique d'efficacité (investir sur ou à proximité des arcs à plus forts flux), mais d'équité (mieux distribuer les flux), de limiter les différences de potentiel d'interaction et donc de limiter le processus de concentration de la population dans et à proximité des plus grandes villes.

En outre, la variété des configurations finales obtenues au regard des topologies de réseau montre une nouvelle fois que les réseaux de transport ne sont pas que de simples supports passifs des déplacements. Ils jouent au contraire un rôle moteur dans la construction et le développement des systèmes urbains. Les mêmes actions, de développement économique à l'échelle locale par exemple, n'auront donc pas les mêmes effets selon la logique des réseaux dans lesquelles elles ont lieu. Pour qui veut faire de l'aménagement ou de la prospective, il est donc déterminant de cerner la logique de l'interaction spatiale qu'induit la structure morphofonctionnelle des réseaux (homogénéité vs hétérogénéité des potentiels d'interaction, réseau favorable aux déplacements de courte vs de longue portée, inertie vs variabilité de la logique du réseau, etc.) pour mieux maîtriser les effets à moyen et long terme de telle ou telle politique d'aménagement.

Jusqu'à présent, le modèle « Émergence » n'a été utilisé que pour des réseaux et des configurations de villes théoriques. Notre logique de simulation ne consiste pas à obtenir des configurations collant aux réalités empiriques. Cela nécessiterait de passer d'une approche KISS à KIDS. Il s'agit bien de comprendre l'effet des différents paramètres du modèle sur les configurations obtenues pour mieux cerner les logiques de structuration des systèmes de villes au regard de différentes logiques d'interaction. Nous avons néanmoins testé le modèle émergence à partir de données géo-historiques. Il s'agit donc de voir si les logiques d'émergence simulées par notre modèle permettent, à partir d'une distribution réelle de villes, d'aboutir à des distributions statistiques et spatiales des villes « crédibles ».

### **3.5 Tester le modèle « Émergence » sur des données historiques**

Comme précédemment (cf. 2.4.1), nous avons utilisé les données d'Euratlas sur la localisation de 163 lieux habités recensés en l'an 300 (les localisations sont réelles, mais pas les populations respectives qui ne sont pas connues). En l'absence de base de données fiable sur les réseaux de transport anciens, le réseau utilisé pour relier ces villes est le réseau « Triangle » construit en

faisant une triangulation de Delaunay (chaque triangle a pour sommet trois villes choisies de façon à ce que toutes les villes soient connectées et qu'aucune ville ne soit à l'intérieur d'un des triangles obtenus). La triangulation de Delaunay permet donc d'obtenir un réseau « homogène » et un treillage du territoire, c'est à dire « l'ensemble des réseaux de circulation de l'espace géographique en général, d'un pays ou d'une contrée en particulier » (Brunet, Ferras, Théry, 1992) qui connectent rapidement toutes les villes entre elles sans fortes inégalités de connexion, ce qui n'est pas le cas des réseaux « Voisins » et « P-C ».

Le réseau « Triangle » est donc le seul réseau qui permet d'étudier l'émergence des villes sur l'ensemble du territoire. Il présente par ailleurs une topologie qui se rapproche bien de celle du réseau national français actuel. À titre de comparaison, nous avons utilisé le fichier du réseau routier national composé des autoroutes, des routes nationales et de leurs bretelles respectives (cf. Figure 62).

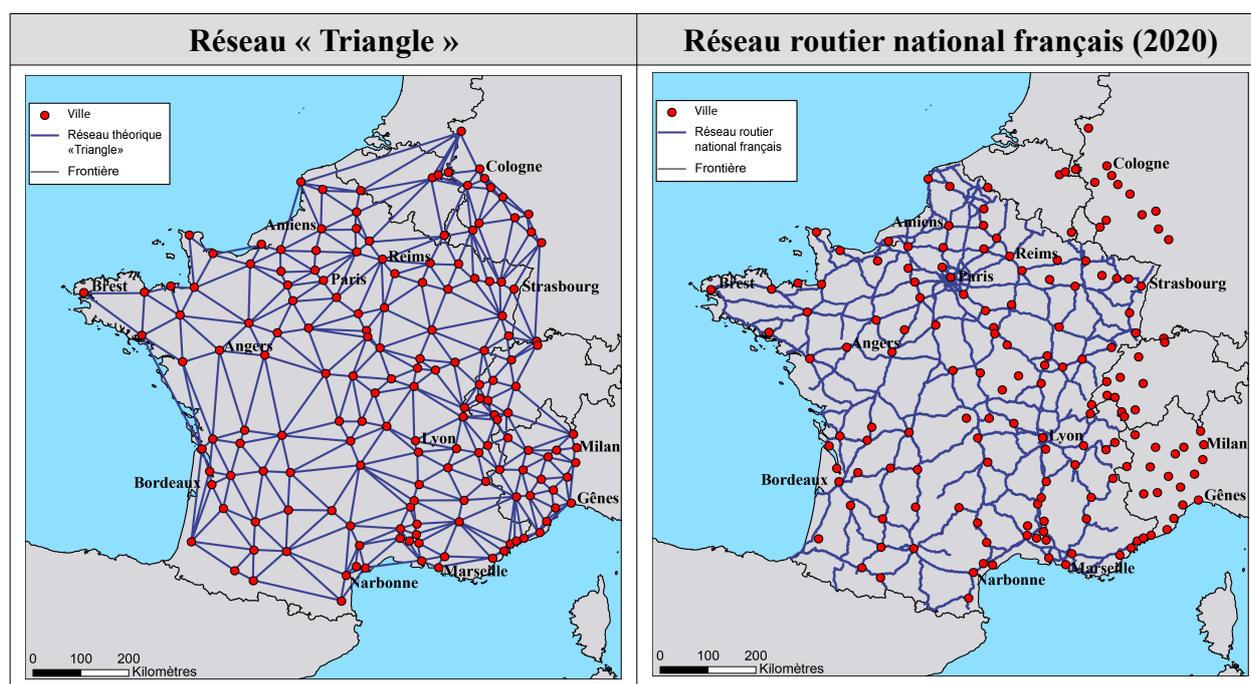


Figure 62: Comparaison entre le réseau théorique « Triangle » et le réseau routier national français (RNN) (source : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/liaisons-du-reseau-routier-national>)

Le réseau « Triangle » étant relativement homogène, il revient donc à minimiser l'influence de la topologie du réseau dans les résultats de simulation.

Sur la base de ces données historiques et du réseau théorique construit, on va chercher à voir où vont émerger les villes : à proximité des villes actuelles importantes ? Sous forme de grappes ? Sur les littoraux ?

Dans cette perspective, nous avons de nouveau fait varier les principaux paramètres de l'interaction afin d'en tester les effets sur la dynamique d'émergence de nouvelles villes. Les paramètres utilisés et les valeurs retenues ont été les suivants :

1. Le taux de migration : 1%,
2. Le mode d'interaction simulé : ALL ou ORIGINE,

3. La probabilité d'émergence d'un nouvel arc suite à l'émergence d'une nouvelle ville : 50% ou 100%. Ici, nous avons donné la possibilité qu'un arc émerge à chaque fois qu'émerge une nouvelle ville afin d'étudier les conséquences d'une coévolution systématique d'un système de villes avec son réseau de transport.
4. La population initiale de chaque ville : 50,
5. Le réseau de transport théorique « Triangle ».

### 3.6 Résultats des simulations géo-historiques

La présentation des résultats va d'abord se focaliser sur les localisations des nouvelles villes obtenues après simulations, puis étudier les distributions hiérarchiques en fonction de la distribution théorique rang-taille.

#### 3.6.1 Répartition spatiale des nouvelles villes

Une cartographie des 266 plus grandes villes métropolitaines françaises actuelles a été réalisée afin d'appréhender la pertinence des localisations des nouvelles villes obtenues lors des simulations. Ce nombre a été retenu, car c'est le nombre maximal de villes finales obtenues lors d'une simulation.

Nous avons mis en comparaison la localisation des villes initiales en l'an 300 avec celles des plus grandes villes actuelles. Ce ne sont pas les mêmes localisations entre les villes initiales de la zone d'étude, base de nos simulations, et la localisation des 266 plus grandes villes françaises. Ces dernières montrent une forte métropolisation et densification urbaine autour de Paris avec la concentration spatiale des 107 des 266 plus grandes villes. Mais aussi autour de Lyon, Bordeaux, au nord de Lille avec la frontière belge et, une densification du pourtour sud-est méditerranéen et de Marseille.

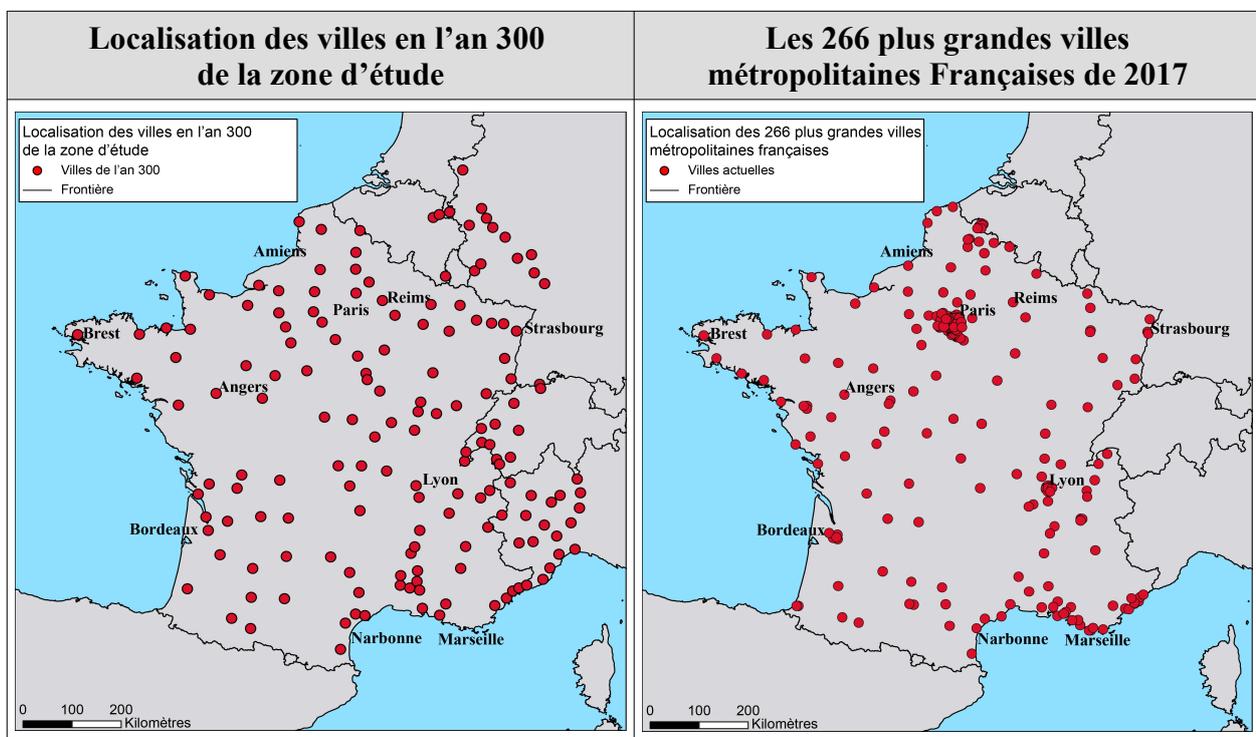


Figure 63: Comparaison des localisations des villes en l'an 300 et actuelles. (Source: Euratlas et INSEE)

L'étude des représentations cartographiques de la localisation des villes émergentes (cf. Figure 64) permet d'illustrer plusieurs points intéressants.

Une nouvelle fois, on constate la différence entre le nombre de villes qui émerge pour le mode d'interaction ALL, entre 101 et 103, et le mode d'interaction ORIGINE, entre 38 et 40.

Le mode d'interaction ORIGINE force les agents Marchands à interagir uniquement avec les agents de la ville de Destination, qui sont en général, les villes les plus attractives du système à savoir les métropoles. Les interactions vont alors se localiser sur quelques grands axes de communication majeurs, et non plus avec les villes intermédiaires, qu'un Marchand va traverser lors de son déplacement. Les quelques villes qui ont émergé permettent la création de villes intermédiaires et de créer une densification urbaine sur les axes :

- Bordeaux – Dax,
- Tours – Bourges,
- Strasbourg et la région de Zurich.

Le mode d'interaction ALL va permettre aux villes les plus périphériques d'échanger entre elles. Pour les simulations réalisées avec le mode d'interaction ALL, plusieurs axes urbains émergent, en complément de ceux cités ci-dessus, entre plusieurs villes d'importance nationale ou régionale. Citons alors les axes :

- Angers – Le Mans – Paris – Amiens,
- Melun – Soissons,
- Paris – Reims – Luxembourg – Trèves,
- L'axe rhodanien Valence – Avignon – Beaucaire,
- Puis l'axe méditerranéen qui se connecte avec l'axe rhodanien avec Salon-de-Provence – Fréjus – Monaco – Gènes.

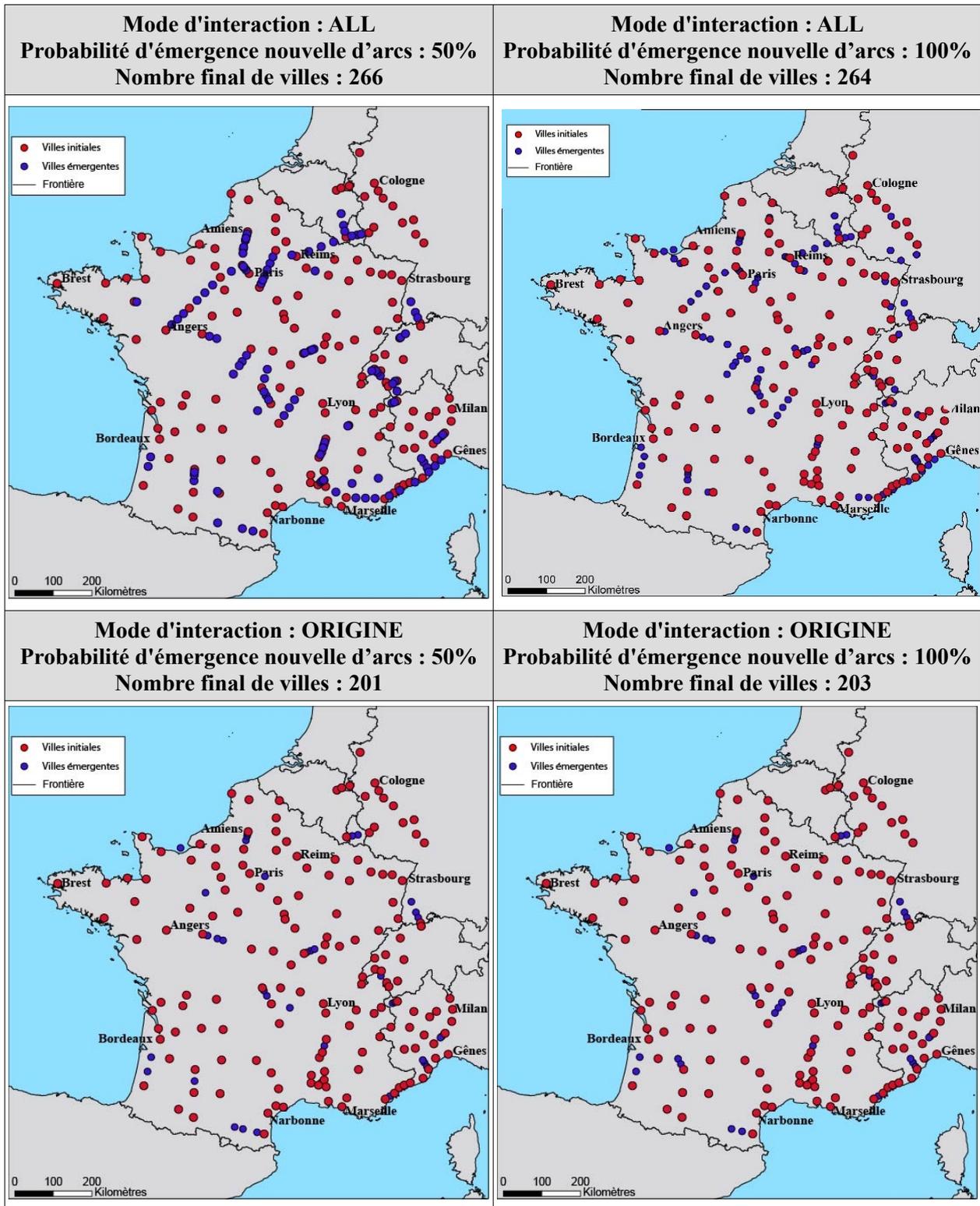


Figure 64 Résultats cartographiques de la localisation des villes émergentes (modèles géo-histoire Émergence pour le réseau « Triangle »)

Globalement, les simulations avec le mode d'interaction ALL donnent les meilleurs résultats en matière de localisation de nouvelles villes puisqu'elles reproduisent des structures spatiales crédibles avec la densification urbaine linéaire du système le long des principaux axes de communication entre les villes les plus dynamiques du système.

Afin d'approfondir l'étude de la qualité des localisations simulées des villes, nous avons pris la localisation des plus grandes villes métropolitaines françaises afin de les catégoriser selon que les simulations ont fait émerger des villes à proximité (10 et 20km) ou non. Une fois de plus, le mode d'interaction ALL donne les meilleurs résultats. Il permet de faire émerger des villes sur des localisations proches de celles des grandes villes actuelles (cf. Figure 65). Il existe toutefois un décalage entre la localisation des plus grandes villes actuelles et les localisations obtenues par les simulations, notamment avec le mode d'interaction ORIGINE. La localisation des villes n'est bien évidemment pas seulement le résultat de l'interaction.

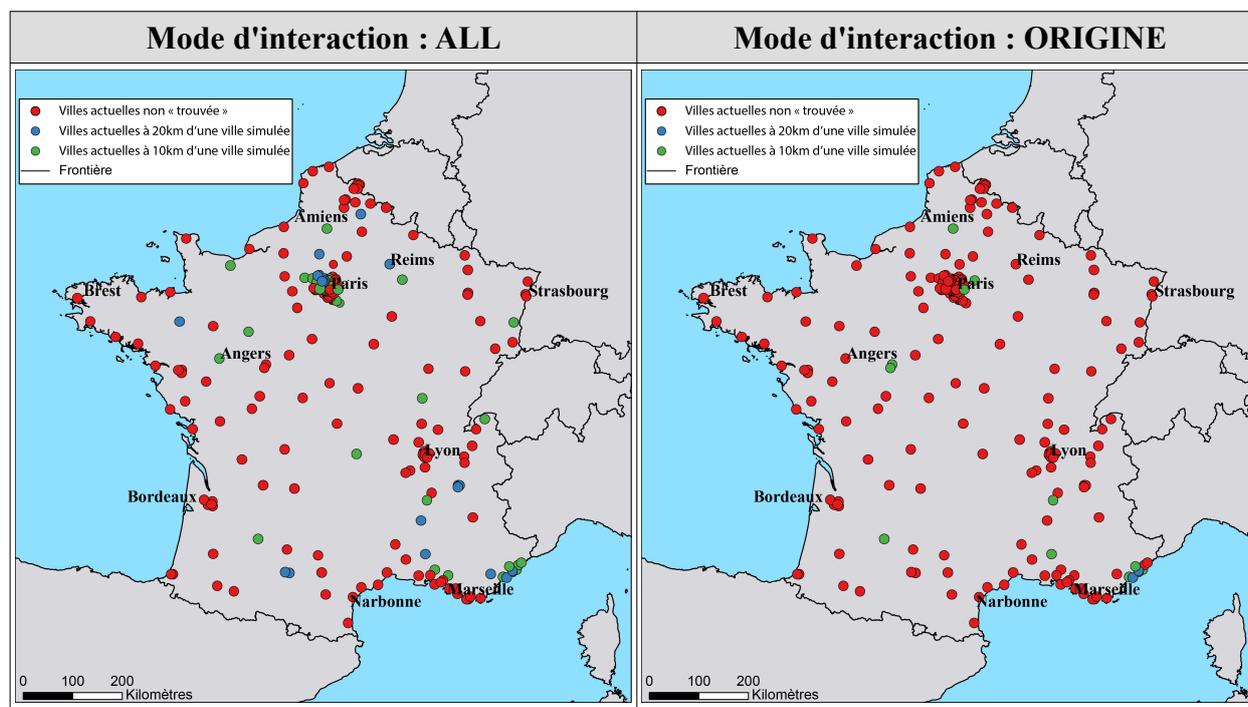


Figure 65 Pertinence des localisations des villes émergentes obtenues en fonction de la localisation des 266 plus grandes villes métropolitaines françaises de 2017

L'étude des distances moyennes (cf. Tableau 43) entre les villes émergentes montre une concentration spatiale moins marquée que lors des simulations théoriques précédentes (cf. 3.4.6.1). Cependant, ces valeurs sont à relativiser avec l'étendue de la zone d'étude et le nombre de villes initiales qui augmente naturellement l'espacement et le potentiel de concentration des nouvelles villes. Comme il y a plus de villes en interaction, la répartition spatiale de l'interaction est moins concentrée. Même si les nouvelles villes émergent à proximité d'autres villes émergentes, elles seront moins groupées.

Il apparaît toutefois que la dynamique de densification et de « métropolisation » se confirme une fois de plus. Les distances moyennes entre une ville émergente et une ville initiale sont comprises entre 2.5 et 2.8 alors que les longueurs moyennes des arcs, en fin de simulation, sont comprises entre 24 et 28. Donc, les nouvelles villes émergent à proximité d'une ville initiale et non pas à égale distance entre deux villes initiales. Il y a *de facto* une concentration urbaine autour des villes. Le territoire se structure autour de quelques grandes villes attractives et dynamiques.

Paramètres	Distance moyenne initiale	Distance moyenne entre les villes émergentes			Longueur moyenne des arcs	Distance moyenne entre une ville émergente et la ville initiale la plus proche		
		Min	Max	Moyenne		Min	Max	Moyenne
ALL, Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 50%	111	75	135	96	24	1	8	2.5
ALL, Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 100%	111	76	135	98	28	1	8	2.6
ORIGINE, Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 50%	111	82	137	108	24	1	8	2.8
ORIGINE, Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 100%	111	78	137	105	26	1	8	2.8

Tableau 43: Les distances (en Lieux) moyennes entre villes émergentes et avec les villes initiales les plus proches (modèle géo-histoire Émergence)

Les logiques de localisation des nouvelles villes obtenues par simulation correspondent à des logiques actuelles. On y retrouve la densification et la concentration urbaine linéaire le long des principaux axes de communication qui connectent les villes les plus attractives :

- Paris se trouve ainsi au croisement de plusieurs axes d'interaction qui vont lui conférer une localisation avantageuse afin de renforcer son assise territoriale. On constate l'émergence de « couloirs urbains » sur lesquels les villes émergent, car l'interaction entre de nombreuses villes attractives s'effectue.

- L'urbanisation localisée sur les axes rhodanien et méditerranéen est un fait actuel, car ce sont deux axes de communication majeurs au niveau national et européen.

- L'étude de la localisation des villes émergentes montre aussi qu'on retrouve la localisation des villes ayant des fonctions de centre régional ou départemental, de logistique et de desserte de l'arrière-pays comme Fribourg-en-Brigau, Caen ou Manosque.

Les simulations, et notamment celles réalisées avec le mode d'interaction ALL, montrent comment la dynamique globale d'urbanisation d'un territoire peut s'expliquer par la simple étude des interactions entre les villes. Les logiques de localisation de nouvelles villes sont, en partie, le résultat des interactions internes au système, mais font aussi échos aux logiques d'implantation des activités et des lieux de vie le long des fleuves (Rhône), et de la mer (Méditerranée) pour avoir accès à des voies de communication naturelles et des ressources stratégiques vitales.

Si la localisation des villes émergentes est à expliquer, la « non-émergence » est aussi à traiter. Deux grandes zones géographiques ne connaissent aucune émergence de nouvelles villes :

- La zone Ouest qui va du Finistère en passant par la Vendée jusqu'au Tarn et la Lozère,
- La zone Nord-Est délimitée par la Meuse, le Loiret et le Doubs.

Concernant la Bretagne, le fait d'être en bordure du réseau de transport et enclavé explique qu'il n'y ait pas d'émergence de villes, car il y a trop peu d'interaction avec les autres villes du

système. Les villes périphériques sont désavantagées. La prise en compte du transport maritime, permettant une ouverture sur l'extérieur, pourrait cependant être un avantage pour les villes portuaires de Bretagne. Il serait pertinent à l'avenir d'intégrer le transport maritime aux simulations. Pour les autres départements concernés, peu de villes ont su capter les flux d'interaction et ont subi l'attractivité des villes attractives voisines.

Une zone tampon, où émergent des villes, existe entre ces deux zones géographiques. Elle est composée des départements du centre du territoire tels que le Puy-de-Dôme, la Loire et l'Allier. Ce phénomène s'explique par le fait que certains paramètres ne sont pas pris en compte tels que le relief, le réseau de transport de l'époque et l'attractivité économique des villes. ***C'est pour ces mêmes raisons que les simulations n'ont pas permis de trouver la localisation des villes actuelles. La simple interaction entre les villes ne permet pas de retrouver leur localisation. En effet, la taille des villes et leur localisation réelle vont aussi dépendre des logiques économiques, culturelles, religieuses, ou politiques.***

### 3.6.2 Hiérarchie

L'étude des distributions (cf. Figure 66 et 67) confirme la tendance des systèmes de villes à converger vers un modèle unique où il y a peu de villes de grandes tailles et beaucoup de petites. Dès que le système de villes fait émerger de nouvelles villes, le potentiel d'interaction et la croissance des villes sont inégaux. À terme, cela donne des systèmes de villes avec des inégalités de peuplement marquées. Les hiérarchies obtenues semblent confirmer la convergence des hiérarchies vers une structure unique, mais sans correspondre à une distribution rang-taille.

La distribution hiérarchique des 266 plus grandes villes françaises est structurée selon cette logique. Elle montre aussi que les simulations, notamment avec le mode d'interaction ORIGINE, tendent à converger vers une distribution hiérarchique crédible.

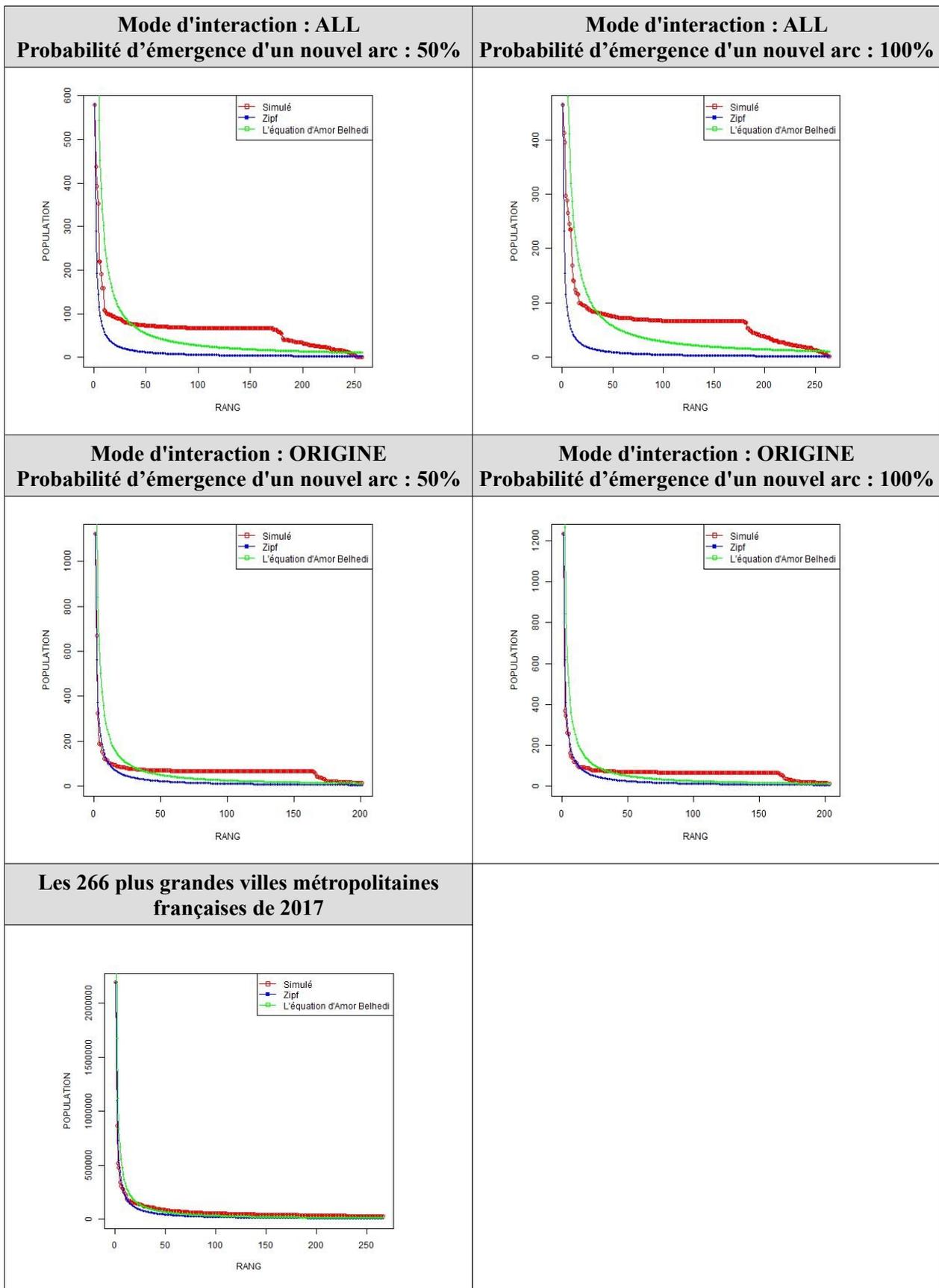


Figure 66: Comparaison entre des distributions hiérarchiques simulées (modèles géo-histoire Émergence) et des distributions hiérarchiques théoriques et réelles. En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi (Source : INSEE)

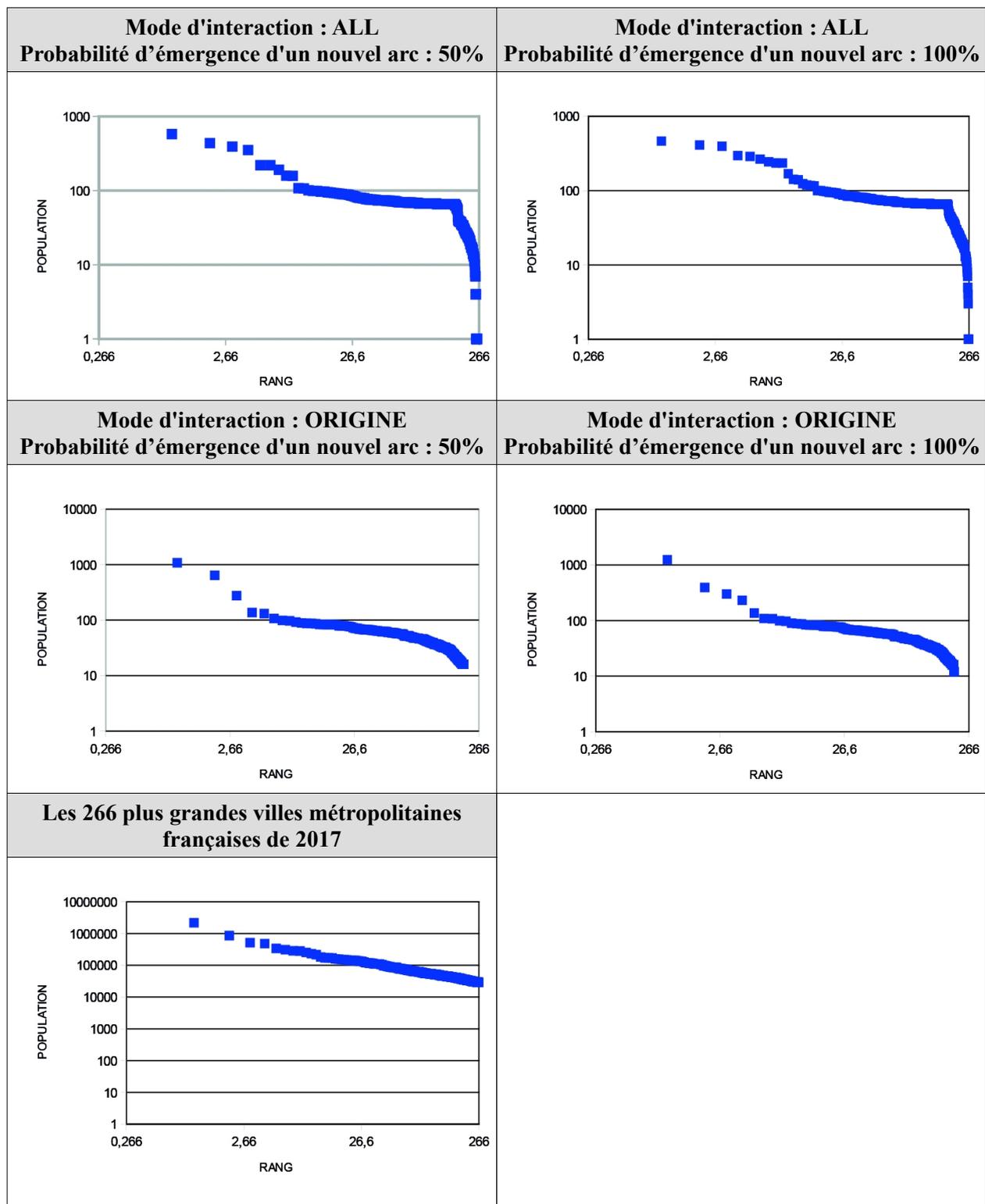


Figure 67: Distributions hiérarchiques (log-log) selon les paramètres de simulations et, distribution hiérarchique actuelle des plus grandes villes métropolitaines françaises (modèles géo-histoire Émergence)

L'observation des écarts à Zipf des systèmes urbains obtenus sur la base des données empiriques de l'an 300 montre que nous n'obtenons pas de distribution hiérarchique des villes selon une distribution statistique rang-taille mais que les écarts, compris entre 14 000 et 17 000, restent relativement faibles. Le ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile est compris entre 1.24 et 2.19 et le ratio entre la taille de la première et la dernière ville est compris entre 70 et 578, ce qui montre qu'il existe une forte inégalité de peuplement entre le sommet et la queue de la hiérarchie. Les mêmes traitements pour les 266 plus grandes villes métropolitaines françaises donnent une somme des écarts de 8 000, le ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile de 75 et, le ratio entre la taille de la première et la dernière ville est de 1.9 .

Paramètres	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)	Ratio entre la taille moyenne du premier décile et du dernier décile (simulé)
Mode d'interaction : ALL Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 50%	16	578	1.66
Mode d'interaction : ALL Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 100%	17	464	1.24
Mode d'interaction : ORIGINE Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 50%	14	70	2.19
Mode d'interaction : ORIGINE Probabilité d'émergence d'un nouvel arc : 100%	14	102	2.18
Les 266 plus grandes villes métropolitaines françaises de 2017	8	75	1.9

*Tableau 44: Comparaison entre les modèles théoriques (modèle géo-histoire Émergence) et la distribution des plus grandes villes métropolitaines françaises actuelles. Source : INSEE*

Nous obtenons alors des hiérarchies prononcées. Le mode d'interaction ORIGINE permet de réduire les écarts entre le modèle théorique et à la distribution réelle des villes. Cependant, les résultats des simulations ne permettent toujours pas de correspondre à une distribution rang-taille des villes.

La répartition spatiale de la population des villes simulées (cf. Figure 68) montre l'existence de plusieurs pôles urbains attractifs qui concentrent la population. Le mode d'interaction ALL permet une distribution plus homogène de la population tandis que le mode d'interaction ORIGINE entraîne une concentration de la population dans quelques villes.

Il n'y a pas de concentration spatiale des plus grands noyaux urbains entre eux ce qui représente bien le phénomène actuel de métropolisation où quelques villes ont des fonctions de capitale régionale et attirent à elles la population environnante. Le territoire est donc bien organisé autour de ces métropoles.

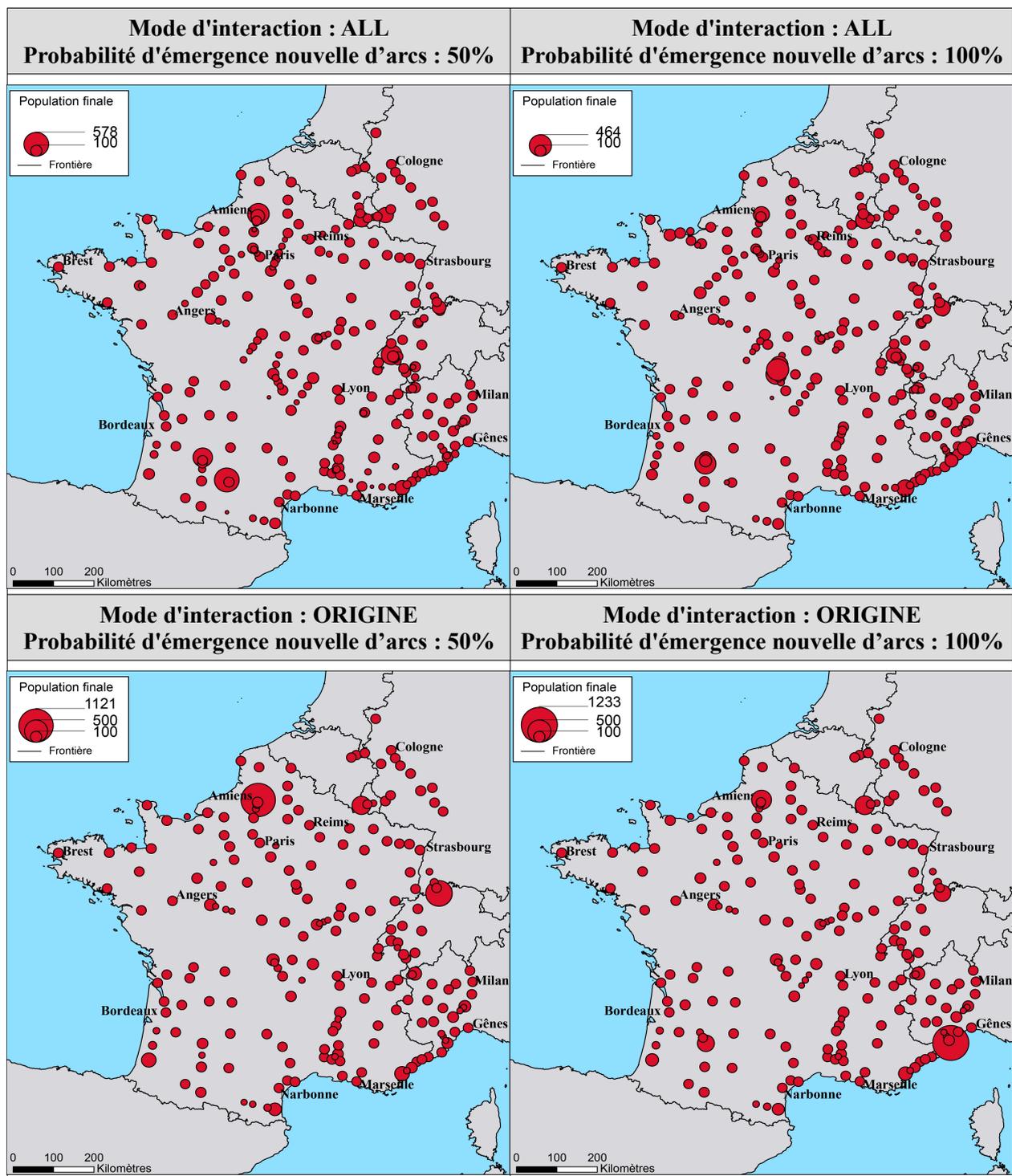


Figure 68: Résultats cartographiques de la répartition spatiale de la population (modèles géo-histoire Émergence pour le réseau « Triangle »)

*Pour conclure, le mode d'interaction ORIGINE permet une distribution hiérarchique plus crédible puisqu'elle se rapproche de la distribution hiérarchique des 266 plus grandes villes françaises. À l'inverse, le mode d'interaction ALL permet une distribution spatiale des nouvelles villes plus crédible en permettant de reproduire la densification urbaine à proximité des villes les plus dynamiques et en permettant de faire émerger des villes sur des localisations de villes actuelles.*

C'est pour cette raison qu'il faudrait concilier les deux modes d'interaction en intégrant la différenciation des biens et services échangés. Ainsi, le modèle pourrait prendre en compte les relations de complémentarité et de concurrence entre les villes qui résultent de l'hétérogénéité du territoire et des spécialisations des villes.

L'organisation et la structure du système de villes ont évolué vers des structures spatiales crédibles avec l'émergence de « noyaux » urbains autour des villes attractives ou de la densification urbaine le long des axes majeurs de communication. Enfin, la répartition spatiale de la population, concentrée dans quelques grands « noyaux » urbains concurrents, est respectée.

Au final, ces simulations n'ont pas permis de reproduire fidèlement l'organisation spatiale du territoire étudié. Une démarche de modélisation KISS ne prend pas en compte de nombreux paramètres comme le relief ou la diversité des productions. Le seul potentiel d'interaction entre villes ne suffit pas à expliquer leur localisation. Ce n'est pas parce que deux villes sont à proximité qu'elles vont interagir. Il existe des barrières naturelles, culturelles, religieuses et politiques à prendre en compte.

### **3.7 Conclusion modèle « Émergence »**

Il existe un manque d'études théoriques et de modèles visant à étudier des systèmes de villes variables dans le temps, pour lesquels de nouvelles villes peuvent émerger et modifier le réseau de transport. Le modèle créé a permis de simuler et d'étudier cette émergence de nouvelles villes, en fonction des interactions entre des villes initiales se déroulant sur les réseaux de transport. Lorsque les individus se déplacent afin d'échanger avec des individus d'autres horizons, ils se rencontrent en dehors de leur ville. L'hypothèse du modèle a été de poser que les nouvelles villes vont émerger là où des échanges fructueux et réguliers entre individus en mouvement ont lieu. Le modèle qui fait varier les conditions de l'interaction, notamment en proposant plusieurs topologies de réseaux de transport, a permis d'étudier les effets de l'émergence de nouvelles villes sur les systèmes de villes obtenus par simulation. On a ainsi pu observer, d'une part une convergence des structures hiérarchiques vers un modèle unique se rapprochant de la loi rang-taille et, d'autre part, la formation de concentrations urbaines sous forme d'agglomérats ou sous une forme plus linéaire le long des axes de communication, concentrations que l'on peut rapprocher de la dynamique de métropolisation des territoires actuels.

L'analyse des logiques spatio-temporelles de l'émergence des villes (Où ? Quand ?) a permis de voir que les premières villes à émerger se localisent à proximité des villes les plus attractives du système initial, c'est-à-dire celles qui ont les meilleurs potentiels d'interaction. La logique peut être ici assimilée à celle du « *preferential attachment* » observée pour les réseaux selon laquelle un nouveau sommet d'un réseau va chercher en priorité à se connecter aux sommets ayant la plus forte nodalité (Barabási, Albert, 1999). La localisation des premières villes émergentes va ensuite influencer la localisation des suivantes. En effet, les premières villes vont créer des foyers attractifs en renforçant l'attractivité des villes initialement déjà les plus dynamiques. Ces foyers attractifs vont ensuite capter de nombreux flux migratoires et influencer la destination des flux marchands (des interactions entre Marchands). Les nouvelles villes vont alors logiquement émerger dans ou à proximité de ces foyers attractifs, formant des concentrations urbaines rappelant la dynamique de métropolisation.

Précisons que même si quelques villes émergentes vont parvenir à acquérir un potentiel d'interaction suffisamment élevé pour atteindre le sommet de la hiérarchie, la majorité d'entre elles va subir l'attraction des villes à proximité desquelles elles émergent, ce qui limite de fait leur perspective de croissance. Aussi, ces nouvelles villes se retrouveront *in fine* majoritairement

dans la queue de la distribution statistique du système de villes final. À de rares exceptions près (là où résolument le capital spatial local pour l'interaction était bon et où il n'y avait pas de ville initiale attractive), la simulation de l'émergence urbaine conduit donc à un processus de lissage des distributions obtenues, plus qu'à leur « chamboulement complet ».

Lorsqu'on ne permet pas l'émergence de nouvelles villes, les réseaux de transport modélisés ne permettent pas d'aboutir aux mêmes structures hiérarchiques finales (cf. 2.2.5). Cependant, on note une convergence des hiérarchies vers une seule structure commune : peu de très grandes villes, quelques villes de tailles moyennes et beaucoup de petites villes, alors qu'à l'état initial les réseaux de transport modélisés offraient des potentiels d'interaction inégaux.

Cette convergence des hiérarchies vers une structure unique correspond au fait que l'auto-organisation, dans un système modélisé dont le sens est de « promouvoir » les interactions entre les villes, va renforcer les connexions et la croissance des villes les plus dynamiques. Sans intervention d'un pouvoir central, planificateur, tout se passe comme si les systèmes de villes évoluaient « naturellement » vers une structure où la distribution des potentiels d'interaction et de la population est inégalement répartie dans les villes.

Les simulations effectuées avec le modèle « Émergence » n'intègrent pas de paramètres sociétaux et environnementaux en se focalisant sur le rôle de l'interaction dans la compréhension du processus d'émergence de nouvelles villes au sein d'un système déjà structuré. Aussi, s'il permet de retrouver des dynamiques observées empiriquement, comme la formation de fortes concentrations urbaines, et s'il permet de faire converger les systèmes de villes obtenus vers un modèle unique se rapprochant de la loi rang-taille, il ne peut en revanche pas être utilisé en l'état pour reconstituer la trajectoire d'un système de villes réel en partant d'un système ancien dans lequel ne figeraient pas encore toutes les villes. Pour cela, il lui faudrait, *a minima* prendre en compte le relief ou les différences de production entre les villes qui interviennent assurément sur la direction et l'intensité des échanges.

Pour autant, malgré sa simplicité voulue, ce modèle permet d'obtenir en sortie de simulation des configurations spatiales tout à fait crédibles, c'est-à-dire correspondant aux logiques observées empiriquement (différenciation spatiale dans la concentration urbaine, distances intervilles, etc.). Étudier les logiques d'interaction au-delà de la seule logique gravitaire, permet donc de bien « dégrossir » la compréhension de la structuration des systèmes de villes avec très peu de variables et d'hypothèses théoriques. Toutefois, la prise en compte d'autres éléments dans une approche KIDS, tels que les inégalités dans la possibilité de développement des villes eu égard au relief, à la qualité des sols, ou encore la prise en compte de la théorie de l'innovation et de diffusion, restent nécessaire pour qui veut simuler des systèmes de villes empiriques.



## Conclusion

Le constat est déjà ancien de l'ubiquité, à l'échelle mondiale, de distributions hiérarchiques dans la description de la taille des villes intégrées dans des systèmes plus ou moins vastes. Cette hiérarchie a été décrite par Zipf (Zipf, 1949) dans sa célèbre « loi rang-taille », qui en réalité n'a rien d'une loi, mais qui est davantage un modèle statistique de référence pour lequel les résidus peuvent être localement importants. Néanmoins, même si la « loi rang-taille » n'est pas en toute rigueur ubiquiste, on observe en revanche partout des systèmes composés de peu de très grosses villes, davantage de moyennes et encore plus de petites. Cette distribution statistique s'accompagne aussi d'une certaine régularité dans les espacements entre les villes. Tout se passe comme s'il était impossible « d'échapper » à cette distribution inégale de la population, véritable « attracteur », alors qu'à l'origine le peuplement était beaucoup plus homogène et que d'autres trajectoires paraissaient théoriquement envisageables. Le pourquoi de cette ubiquité des systèmes urbains hiérarchiques a été, et demeure, une des grandes questions posées aux géographes : comment et pourquoi le système de peuplement est passé de foyers isolés et de taille relativement identique à des systèmes de villes hiérarchisés et connectés ?

Nous souhaitons faire un pas de côté par rapport aux explications actuellement les plus importantes et étayées théoriquement et qui reposent sur les théories des économies d'agglomération (Marshall, 1890) et de la diffusion inégale de l'innovation et de ses effets induits en termes d'inégalité de croissance (Pumain, 1997 ; Pumain, Saint-Julien, 2010 ; Pumain, 2012a), théories qui nécessitent, pour être testées, des simulations lourdes reposant sur des hypothèses très nombreuses et pas toujours assurées. Aussi, nous avons cherché à explorer le rôle spécifique que pourraient avoir différentes logiques régulant les interactions sur la croissance allométrique des systèmes de villes. En effet, le plus souvent, ces interactions entre les villes, qui se matérialisent par des flux matériels ou pas, sont analysées ou modélisées avec une grille de lecture gravitaire : plus les lieux sont gros (population nombreuse) et proches, plus ils sont supposés échanger et plus un lieu est gros et proche plus il sera attractif. Sans remettre en question cette hypothèse gravitaire, nous l'avons « complétée » avec d'autres logiques pour en explorer les effets sur la croissance des systèmes de villes.

Cette recherche a été motivée par le fait que les villes ne sont pas des objets spatiaux isolés. Elles interagissent entre elles dans des logiques de coopération et de concurrence. Elles sont donc prises dans des systèmes de villes, des interdépendances, à des échelles variables. La population d'une ville au temps  $t$  est donc le résultat de sa croissance démographique endogène (son solde naturel) et de son solde migratoire (les entrées de population moins les sorties). Or, dans les systèmes de villes, on observe que la croissance naturelle est globalement, pour une période donnée, relativement identique pour l'ensemble des villes, notamment si le système considéré correspond à une construction politique (un État) car alors les mêmes règles (conditionnant les comportements démographiques) s'appliquent peu ou prou partout de la même façon. Si la croissance naturelle est relativement identique dans un système, les différences de croissance sont donc à attribuer au solde migratoire et donc aux différences d'attractivité des villes qui orientent les flux migratoires. Même en rejetant cette hypothèse d'homogénéité des taux de croissance, il nous a néanmoins paru intéressant, dans une perspective exploratoire (et non inductive), de voir les effets de ces autres logiques d'interaction non gravitaires sur le système de villes, de la même manière que Gabaix (Gabaix, 1999a ; 1999b) a par exemple exploré le rôle d'interactions réglées par l'aléatoire sur les systèmes de villes. Parvenir à simuler des systèmes urbains de type rang-taille en ne mobilisant aucune base théorique géographique ou économique

pourrait à l'extrême permettre d'aller jusqu'à questionner l'intérêt de ces appareils théoriques, du moins si on se contente de vouloir décrire et prévoir, et pas forcément expliquer.

Dans un premier temps, nous avons ainsi analysé les effets d'une logique d'interaction aléatoire, puis d'une logique d'interaction pour laquelle l'attractivité des villes, et donc leur croissance, dépendrait de l'intensité de leur participation dans l'historique des échanges. De la même façon que l'on observe dans le cerveau que l'information passe prioritairement par les neurones qui ont été préalablement intensément sollicités (Hebb, 1949), nous avons simulé et étudié pour les systèmes de villes celle logique de « prime à l'activité ». Si on postule que plus une ville participe aux échanges dans un système de villes, plus elle va être attractive et donc capter des flux, obtient-on des réseaux de villes hiérarchisés et, si tel est le cas, se rapprochent-ils des réseaux types rang-taille ? Cette logique d'interaction relevant « d'une prime à l'activité » a été testée seule, en combinaison avec une logique gravitaire pour un espace euclidien, et enfin en tenant compte de l'anisotropie de l'espace due aux réseaux de transport.

Poursuivant cette volonté d'étudier l'effet de différentes logiques d'interaction sur les systèmes de villes, nous nous sommes dans un second temps intéressés à la question de l'émergence des villes. On ne peut en effet que constater le manque d'études théoriques et de modèles visant à étudier des systèmes de villes variables dans le temps, c'est-à-dire dans lesquels de nouvelles villes peuvent émerger, même s'il est bien évident que l'émergence de ces nouvelles villes ne peut qu'impacter la croissance relative des autres.

Dans cette perspective, nous avons réalisé un modèle de simulation reposant sur l'hypothèse selon laquelle les localisations des nouvelles villes correspondent aux lieux où des échanges nombreux, fructueux et réguliers entre des individus se déplaçant temporairement d'une ville à l'autre peuvent avoir lieu. Là encore, cette approche se veut complémentaire des approches traditionnelles en Géographie qui attribuent aux facteurs naturels (qualité des sols, présence de l'eau) ou aux situations géographiques (situation d'interface terre-mer, plaine-montagne, etc.) un rôle déterminant dans la localisation des villes. De nouveau, c'est une logique exploratoire et modélisatrice de type KISS qui a été retenue. Il s'agissait d'étudier dans quelle mesure cette hypothèse « simple » selon laquelle des villes se créent là « où ça vaut le coût », pour de nombreux individus, permettait ou pas de simuler de façon cohérente et crédible l'émergence dans un système de villes, pour en voir dans un second temps l'impact sur la croissance allométrique du système.

Le test de ces différentes hypothèses sur l'émergence et la croissance allométrique dans les systèmes de villes ne pouvait se faire qu'en ayant recours à la simulation, puisqu'il n'existe pas de données qui permettraient de les tester empiriquement. Plus précisément, notre positionnement a été d'élaborer, dans une perspective exploratoire, les modèles les plus simples possible (approche KISS), c'est-à-dire reposant sur le jeu d'hypothèses le plus réduit possible : ici les conditions de l'interaction conditionnent la dynamique des systèmes de villes. L'approche est donc déductive, tant par choix que par nécessité, les données sur le temps long sur les populations des villes et les réseaux de transport les connectant n'existant pas. Ainsi au long de cette thèse, il a été montré qu'avec un nombre restreint d'hypothèses et de paramètres, il est possible d'étudier le comportement du système complexe qu'est le système de ville afin d'appréhender ses dynamiques de hiérarchisation et d'évolution.

Pratiquement, le choix s'est porté sur la modélisation Multi-Agents (SMA) avec une approche individu-centrée. Nous voulions voir comment les choix de chaque individu de déménager d'une ville A à une ville B, ou d'échanger en un lieu donné avec un individu venant d'une autre ville,

choix partiellement conditionnés par ceux faits dans le même temps par les autres individus, impactaient la dynamique du système de villes. Dans notre approche, ce ne sont pas des cohortes (par exemple des travailleurs) qui migrent « collectivement » d'une ville A à B, parce que par exemple le marché du travail en B y serait plus porteur, mais bien des individus dont les choix sont dépendants de ceux faits par les autres en même temps et préalablement. Cette interdépendance est une des caractéristiques des systèmes complexes que sont les systèmes de villes que seule la modélisation permet d'aborder. Nous avons recouru à une démarche « pas à pas », complexifiant peu à peu le modèle : test de différentes logiques d'interaction, ajout de l'anisotropie due aux réseaux de transport, puis intégration de l'émergence des villes et de la coévolution des réseaux.

Les résultats montrent qu'il est effectivement possible de simuler, à partir d'un peuplement initial homogène, des systèmes de villes hiérarchisés à l'aide de modèles « simples » individu-centrée. Le degré de hiérarchisation des réseaux de villes obtenus dépend :

- de la logique considérée pour les interactions : une logique aléatoire aboutit par exemple à des systèmes moins hiérarchisés que ceux pour laquelle l'attractivité d'une ville dépend de sa participation aux échanges préalables. Obtenir des réseaux hiérarchisés par simulation apparaît donc « relativement trivial » (Gabaix, 1999a ; 1999b).

- des réseaux de transport. Ils introduisent en effet de l'anisotropie et impactent par conséquent fortement les systèmes de villes obtenus, quelle que soit la logique des interactions considérées. Dans tous les cas, leur prise en compte accentue la hiérarchisation des systèmes, mais les formes de cette hiérarchisation dépendent du type de réseau considéré, de sa topologie et de sa métrique. Un réseau « type » de Manhattan entraîne par exemple une hiérarchisation des villes peu marquée et s'oppose en la matière à un réseau de « type » Invariant d'échelle, qui concentre mécaniquement l'interaction et donc la croissance pour produire des systèmes à la hiérarchie très marquée (avec quelques grandes villes et beaucoup de très petites). Le capital spatial de chaque ville, sa position relative au sein du système de villes et du réseau de transport, conditionne donc fortement sa croissance. Une ville en bordure du système et n'ayant qu'une connexion directe au réseau, par l'intermédiaire d'un seul arc routier, aura un potentiel d'interaction moindre qu'une ville centrale dans le système vers laquelle l'ensemble des arcs du réseau de transport convergent. Si la topologie du réseau de transport compte, les caractéristiques des arcs (vitesse maximale autorisée, longueur du tronçon, etc.) sont également apparues comme ayant un impact sur les systèmes de villes obtenus.

À grands traits, on peut dire que les réseaux relevant d'une logique d'efficacité, c'est-à-dire pour lesquels le ratio longueur-accessibilité est déterminant, et dont la logique est d'abord de bien connecter les villes les plus importantes (ce qui correspond à la logique des investissements routiers et ferroviaires depuis des années), conduisent à une concentration accrue des populations dans quelques foyers. Ils s'opposent à des réseaux relevant plus d'une logique d'équité qui vont mieux répartir la croissance.

Cet impact de la structure morphofonctionnelle des réseaux de transport sur la dynamique des systèmes de villes est relativement connu. Il a été observé à la fois pour des études empiriques et des approches modélisatrices (Baptiste, 1999 ; Pumain, Paulus, Vacchiani-Marcuzzo, 2009 ; Bretnolle, Pumain, 2010 ; Pumain, 2012a ; Mimeur, 2016 ; Raimbault, 2018), même si à l'échelle de la ville la corrélation centralité-accessibilité et croissance n'est pas vérifiée par tous.

Toutefois, le fait d'avoir travaillé avec des idéaux types de réseau (Invariant d'échelle, Small world, Manhattan) nous a permis de mieux maîtriser la logique de mise en relation que

produisent ces réseaux (leur « métrique ») et de voir qu'ils ne sont pas de simples supports des déplacements. Ils jouent au contraire un rôle important sur la croissance allométrique des systèmes de villes, mais aussi sur l'inertie de ces systèmes, qui s'avère globalement forte, mais variable selon le type de réseau. Nous avons en effet pu voir que, selon le type de réseau, des modifications semblables (ajouts d'arcs, modifications de vitesses) ne produisent pas les mêmes effets. Certaines structures de réseaux, les moins connectifs par exemple, portent « en elles-mêmes » la possibilité du changement de trajectoire. Pour ces réseaux, de faibles modifications de topologie peuvent par exemple modifier fortement les configurations des systèmes de villes. À l'inverse, d'autres réseaux (plus connectifs) sont assez peu sensibles. On peut ajouter, supprimer des arcs, changer les vitesses de circulation, etc., l'impact final sera réduit. Les villes au sommet de la hiérarchie le restent bien souvent. Une fois une trajectoire hiérarchique engagée, il va s'avérer très difficile de l'infléchir sauf à recourir à des interventions lourdes, peu crédibles, car allant à l'encontre des contraintes d'efficacité qui pèsent sur les investissements. Citons par exemple le fait de connecter efficacement les plus petites villes du système entre elles et de détériorer dans le même temps le potentiel d'interaction des grandes villes attractives. La « *path dependency* » (Sanders, 2014) dans les systèmes de villes, dépend donc des caractéristiques morphofonctionnelles des réseaux. Pour qui veut agir sur le peuplement, par exemple limiter la métropolisation au profit des villes moyennes et petites, il est déterminant de bien saisir la logique des réseaux de transport qui connectent les villes. Leur métrique reste pourtant un « impensé » car au-delà d'indices globaux qui décrivent les réseaux, il est important de bien maîtriser à qui « profite le réseau » : quelle différenciation spatiale dans la qualité de la mise en relation, quelles différences dans cette qualité de la mise en relation selon la portée des déplacements, etc. (Genre-Grandpierre, 2007 ; 2014).

S'il a été assez simple de faire émerger des systèmes de villes hiérarchisés, nous ne sommes en revanche pas parvenus sur la base de nos hypothèses de modélisation à produire des hiérarchies urbaines correspondant parfaitement à la loi rang-taille. L'introduction de la possibilité de faire émerger des villes et de faire coévoluer le réseau de transport pour mieux coller à la réalité empirique (les systèmes de villes et les réseaux les connectant s'étoffent au fil du temps) avec une modélisation originale, désagrégée, qui s'applique habituellement plus pour simuler l'émergence d'une ville (Batty, 2001 ; Epstein, Axtell, 1996) que l'évolution d'un système de villes, a certes permis d'obtenir des systèmes de villes se rapprochant davantage de la loi rang-taille, en lissant en particulier la tête et la queue de la distribution statistique de la taille des villes, mais sans pour autant obtenir une rang-taille parfaite.

En simulant l'émergence de villes et la coévolution des réseaux, nous avons pu néanmoins produire des configurations spatiales crédibles et retrouver par simulation la logique de la métropolisation : des villes émergent essentiellement à proximité des villes les plus dynamiques ou sur les axes de communications qui y convergent, elles forment alors des « noyaux » urbains. Ces nouvelles villes renforcent le poids des villes initialement les plus dynamiques, mais dans le même temps subissent leur attraction, ce qui limite, sauf exception, leur perspective de croissance.

On peut voir dans cette incapacité du modèle à faire émerger des structures rang-taille un échec ou un soulagement. En effet, cette incapacité montre en creux que la Géographie, l'Histoire et l'Économie comptent. Modéliser de façon « trop » simple l'évolution des systèmes de villes en testant l'effet de différentes logiques d'interaction, et en faisant fi de l'histoire, des conditions naturelles, des théories économiques, n'est pas suffisant pour reproduire des systèmes type rang-

taille (même si les réseaux empiriques ne collent pas tous, tant s'en faut, à ce modèle) et *a fortiori* des configurations empiriques.

Plus conceptuellement, ce travail sur la croissance allométrique des systèmes de villes basée sur la simulation de différentes logiques d'interaction à l'échelle individuelle a permis de montrer que la concentration est la forme spatiale qui s'impose lorsqu'il s'agit de maximiser les interactions à l'échelle individuelle. En l'absence d'intervention forte de planification, un système qui cherche à « maximiser les interactions » individuelles évolue donc tendanciellement vers la concentration, tout comme Fournier et Scarsini (Fournier, Scarsini, 2019) le montrent, avec une modélisation basée sur la théorie des jeux ayant une logique assez proche de la nôtre. Pour eux, le laisser-faire, qui se traduit par la recherche du profit individuel, conduit à la concentration spatiale des commerces et non à l'intérêt commun (des configurations spatiales plus homogènes pour le client) correspondant à un certain « optimum social » et qui requière de la planification spatiale par l'intermédiaire d'un pouvoir de décision supérieur.

En considérant que cette forme spatiale de la concentration, qui permet une maximisation des interactions propices notamment à l'économie, mais pas seulement (Glaeser, 2011), doit être « combattue », mais sans pour autant amorcer le débat sur les avantages-inconvénients de la métropolisation, nos travaux ont montré qu'infléchir cette trajectoire vers la concentration en jouant sur la structure des réseaux est très difficile tant l'inertie du système est importante une fois une trajectoire hiérarchique établie (même si variable selon la logique du réseau considéré).

Les systèmes hiérarchisés, rang-taille ou pas, et la métropolisation semblent être la réponse aux logiques d'interactions actuelles, qu'elles soient intégrées dans la simulation de façon agrégée via une approche économique (cf. 1.5.4 et la famille des modèles Simpop) ou prise en compte à l'échelle individuelle comme nous l'avons proposé. Des interactions aléatoires (Gabaix, 1999a ; 1999b), répondant à une logique gravitaire ou favorisant les lieux les plus « actifs », conduisent toutes à des systèmes hiérarchisés. Pour parvenir à modifier fondamentalement les structures spatiales du peuplement, pour tendre par exemple vers un peuplement plus homogène, il semble donc nécessaire de repenser fondamentalement cette logique des interactions, en particulier leur coût.

Peu ou prou le coût de l'interaction a longtemps été proportionnel à la distance, et aujourd'hui il est même souvent moins coûteux d'interagir avec des villes lointaines en distance euclidienne qu'avec des villes proches en raison de l'anisotropie des réseaux de transport et de la survenue de la grande vitesse qui connecte d'abord les grands pôles, fussent-ils lointains, avec un effet tunnel et une dualisation de l'espace relevé depuis longtemps (Plassard, 1977). Pour changer les structures spatiales, il faut donc changer cette logique de coût des interactions, en promouvant par exemple des interactions qui seraient d'autant plus coûteuses qu'elles se feraient à longue portée. C'est la logique de la « métrique lente » proposée par Genre-Grandpierre (Genre-Grandpierre, 2007) pour lutter contre la dépendance automobile, mais dont le principe peut aussi valoir à l'échelle interurbaine. Rendre le coût de l'interaction, non pas proportionnel à la portée des déplacements, mais « surfacturer » les déplacements les plus longs implique de repenser toute la tarification des transports, vaste chantier, et on peut penser ici que se « contenter » d'intégrer les impacts environnementaux à la tarification des différents modes de transport ne constituera pas un changement suffisant pour modifier fondamentalement la logique des interactions, même si cette internalisation des coûts environnementaux est à réaliser.

Changer de logique d'interaction peut aussi se faire en changeant les échelles des systèmes urbains (cf. 2.3.3). La connexion de systèmes préalablement autonomes produit un système

hiérarchisé à plus grande échelle. Pour éviter une trop forte concentration du peuplement, revenir à des systèmes urbains de plus petite taille, plus autonomes paraît être une possibilité. Cela correspond économiquement à des politiques de protectionnisme qui renchérissent l'interaction « intersystème », mais dont le principe est loin d'être accepté politiquement.

Enfin, des changements fondamentaux dans la structure du peuplement à toutes les échelles peuvent survenir avec l'avènement du numérique qui tend à rebattre les cartes du coût de l'interaction en le dissociant toujours plus de l'espace. Quels seront, à l'échelle locale, les effets du télétravail sur les formes du peuplement et, à l'échelle mondiale, de l'économie du numérique, des inégalités dans la maîtrise des données, dans le contrôle de l'information, etc. ? On voit ici que l'exploration des impacts des logiques d'interactions sur les systèmes de peuplement est loin d'être épuisée.

## Annexes

### Table des annexes

Annexe A : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance topologique.....	194
Annexe B : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance-temps.....	198
Annexe C : Comparaison aux modèles théoriques (modélisation sans émergence de villes).....	202
Annexe D : Localisation hiérarchique des villes émergentes.....	203
Annexe E : Nombre de villes émergentes dans le « top 5 ».....	207
Annexe F : Comparaison globale des potentiels d'interactions entre villes initiales et villes émergentes.....	208

Annexe A : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance topologique

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.09		0.15		0.07		0.15	*
Échange, eigen centrality	0.08		0.14		0.06		0.14	
Échange, closeness2	0.07		0.14		0.06		0.13	
Recoit , betweenness2	0.09		0.15		0.07		0.16	*
Recoit , eigen centrality	0.07		0.14		0.06		0.14	
Recoit , closeness2	0.06		0.15		0.06		0.13	
Population, betweenness2	0.05		0.13		0.06		0.12	
Population, eigen centrality	0.04		0.12		0.05		0.11	
Population, closeness2	0.04		0.13		0.05		0.10	
Rang, betweenness2	-0.07		-0.11		-0.09		-0.10	
Rang, eigen centrality	-0.06		-0.11		-0.08		-0.08	
Rang, closeness2	-0.05		-0.12		-0.08		-0.08	
Population, échange	0.88	*	0.89	*	0.86	*	0.89	*
Rang, classement	0.88	*	0.88	*	0.87	*	0.89	*

Résultats des corrélations pour le réseau de Manhattan (distance topologique) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.64	*	0.63	*	0.64	*	0.63	*
Échange, eigen centrality	0.61	*	0.60	*	0.61	*	0.6	*
Échange, closeness2	0.40	*	0.39	*	0.40	*	0.39	*
Recoit , betweenness2	0.65	*	0.63	*	0.64	*	0.63	*
Recoit , eigen centrality	0.61	*	0.60	*	0.61	*	0.60	*
Recoit , closeness2	0.40	*	0.39	*	0.40	*	0.39	*
Population, betweenness2	0.64	*	0.63	*	0.63	*	0.61	*
Population, eigen centrality	0.61	*	0.6	*	0.6	*	0.58	*
Population, closeness2	0.4	*	0.39	*	0.4	*	0.38	*
Rang, betweenness2	-0.21	*	-0.20	*	-0.21	*	-0.2	*
Rang, eigen centrality	-0.22	*	-0.22	*	-0.22	*	-0.22	*
Rang, closeness2	-0.23	*	-0.24	*	-0.24	*	-0.23	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau Invariant d'échelle homogène (distance topologique) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.61	*	0.62	*	0.62	*	0.63	*
Échange, eigen centrality	0.59	*	0.59	*	0.60	*	0.60	*
Échange, closeness2	0.4	*	0.39	*	0.40	*	0.40	*
Recoit , betweenness2	0.65	*	0.63	*	0.65	*	0.64	*
Recoit , eigen centrality	0.62	*	0.6	*	0.62	*	0.6	*
Recoit , closeness2	0.4	*	0.39	*	0.4	*	0.39	*
Population, betweenness2	0.63	*	0.61	*	0.64	*	0.61	*
Population, eigen centrality	0.60	*	0.59	*	0.61	*	0.59	*
Population, closeness2	0.41	*	0.39	*	0.4	*	0.39	*
Rang, betweenness2	-0.21	*	-0.2	*	-0.21	*	-0.2	*
Rang, eigen centrality	-0.22	*	-0.22	*	-0.22	*	-0.22	*
Rang, closeness2	-0.25	*	-0.24	*	-0.26	*	-0.24	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau Invariant d'échelle hétérogène (distance topologique) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.51	*	0.52	*	0.47	*	0.54	*
Échange, eigen centrality	0.33	*	0.39	*	0.40	*	0.46	*
Échange, closeness2	0.25	*	0.22	*	0.19	*	0.28	*
Recoit , betweenness2	0.51	*	0.52	*	0.49	*	0.54	*
Recoit , eigen centrality	0.35	*	0.40	*	0.42	*	0.47	*
Recoit , closeness2	0.25	*	0.22	*	0.2	*	0.28	*
Population, betweenness2	0.47	*	0.51	*	0.42	*	0.51	*
Population, eigen centrality	0.32	*	0.41	*	0.4	*	0.49	*
Population, closeness2	0.23	*	0.23	*	0.17	*	0.28	*
Rang, betweenness2	-0.41	*	-0.45	*	-0.36	*	-0.43	*
Rang, eigen centrality	-0.25	*	-0.31	*	-0.33	*	-0.39	*
Rang, closeness2	-0.19	*	-0.21	*	-0.14	*	-0.27	*
Population, échange	0.92	*	0.91	*	0.91	*	0.91	*
Rang, classement	0.92	*	0.91	*	0.91	*	0.91	*

*Résultats des corrélations pour le réseau Small world homogène (distance topologique) \*valeur significative*

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.16		0.33	*	0.18		0.29	*
Échange, eigen centrality	0.08		0.23	*	0.08		0.22	*
Échange, closeness2	0		0.14		0.02		0.06	
Recoit , betweenness2	0.35	*	0.46	*	0.38	*	0.44	*
Recoit , eigen centrality	0.2	*	0.34	*	0.21	*	0.35	*
Recoit , closeness2	0.07		0.23	*	0.13		0.14	
Population, betweenness2	0.19		0.42	*	0.22	*	0.37	*
Population, eigen centrality	0.1		0.29	*	0.11		0.3	*
Population, closeness2	0		0.2	*	0.06		0.11	
Rang, betweenness2	-0.33	*	-0.41	*	-0.37	*	-0.36	*
Rang, eigen centrality	-0.19	*	-0.26	*	-0.19	*	-0.28	*
Rang, closeness2	-0.07		-0.21	*	-0.17		-0.11	
Population, échange	0.95	*	0.96	*	0.94	*	0.94	*
Rang, classement	0.95	*	0.96	*	0.94	*	0.94	*

*Résultats des corrélations pour le réseau Small world hétérogène (distance topologique) \* valeur significative*

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.46	*	0.46	*	0.46	*	0.47	*
Échange, eigen centrality	0.43	*	0.44	*	0.41	*	0.44	*
Échange, closeness2	0.45	*	0.46	*	0.43	*	0.46	*
Recoit , betweenness2	0.46	*	0.46	*	0.46	*	0.47	*
Recoit , eigen centrality	0.43	*	0.44	*	0.42	*	0.44	*
Recoit , closeness2	0.46	*	0.46	*	0.44	*	0.46	*
Population, betweenness2	0.46	*	0.45	*	0.45	*	0.46	*
Population, eigen centrality	0.43	*	0.44	*	0.41	*	0.44	*
Population, closeness2	0.45	*	0.46	*	0.43	*	0.46	*
Rang, betweenness2	-0.42	*	-0.43	*	-0.42	*	-0.43	*
Rang, eigen centrality	-0.40	*	-0.42	*	-0.39	*	-0.42	*
Rang, closeness2	-0.44	*	-0.45	*	-0.42	*	-0.45	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau aléatoire homogène (distance topologique) \*valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.36	*	0.36	*	0.36	*	0.36	*
Échange, eigen centrality	0.30	*	0.31	*	0.29	*	0.31	*
Échange, closeness2	0.31	*	0.31	*	0.30	*	0.31	*
Recoit , betweenness2	0.36	*	0.35	*	0.35	*	0.34	*
Recoit , eigen centrality	0.30	*	0.30	*	0.29	*	0.30	*
Recoit , closeness2	0.30	*	0.30	*	0.29	*	0.29	*
Population, betweenness2	0.36	*	0.35	*	0.36	*	0.35	*
Population, eigen centrality	0.30	*	0.31	*	0.30	*	0.31	*
Population, closeness2	0.31	*	0.30	*	0.30	*	0.3	*
Rang, betweenness2	-0.34	*	-0.33	*	-0.34	*	-0.34	*
Rang, eigen centrality	-0.29	*	-0.30	*	-0.29	*	-0.31	*
Rang, closeness2	-0.30	*	-0.30	*	-0.30	*	-0.31	*
Population, échange	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.98	*
Rang, classement	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau aléatoire hétérogène (distance topologique) \*valeur significative

Annexe B : Résultats des corrélations entre les indicateurs de centralité et d'accessibilité sur le rang hiérarchique des villes pour les simulations en distance-temps

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.15	*	0.16	*	0.16	*	0.16	*
Échange, eigen centrality	-0.07		-0.07		-0.07		-0.07	
Échange, closeness2	0.01		0.02		0.02		0.01	
Recoit , betweenness2	0.16	*	0.17	*	0.17	*	0.17	*
Recoit , eigen centrality	-0.07		-0.07		-0.08		-0.07	
Recoit , closeness2	0.02		0.02		0.02		0.02	
Population, betweenness2	0.15		0.15	*	0.16	*	0.17	*
Population, eigen centrality	-0.07		-0.07		-0.08		-0.07	
Population, closeness2	0.01		0.02		0.01		0.01	
Rang, betweenness2	-0.15		-0.17	*	-0.17	*	-0.18	*
Rang, eigen centrality	0.08		0.08		0.10		0.09	
Rang, closeness2	-0.01		-0.02		-0.01		-0.02	
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau de Manhattan (distance-temps) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.15		0.16	*	0.15		0.18	*
Échange, eigen centrality	0.01		0		0		0	
Échange, closeness2	0.06		0.07		0.05		0.07	
Recoit , betweenness2	0.16	*	0.16	*	0.15		0.18	*
Recoit , eigen centrality	0.01		0		0		0	
Recoit , closeness2	0.06		0.07		0.06		0.07	
Population, betweenness2	0.15		0.1		0.16		0.18	*
Population, eigen centrality	0.02		0		0		0	
Population, closeness2	0.06		0.08		0.06		0.07	
Rang, betweenness2	-0.16	*	-0.18	*	-0.16	*	-0.19	*
Rang, eigen centrality	-0.01		0		0		0	
Rang, closeness2	-0.05		-0.07		-0.05		-0.07	
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau de Manhattan tronqué (distance-temps) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.59	*	0.59	*	0.59	*	0.59	*
Échange, eigen centrality	0.29	*	0.28	*	0.27	*	0.28	*
Échange, closeness2	0.45	*	0.45	*	0.45	*	0.45	*
Recoit , betweenness2	0.6	*	0.59	*	0.59	*	0.59	*
Recoit , eigen centrality	0.29	*	0.28	*	0.29	*	0.28	*
Recoit , closeness2	0.45	*	0.44	*	0.45	*	0.44	*
Population, betweenness2	0.59	*	0.58	*	0.57	*	0.59	*
Population, eigen centrality	0.28	*	0.28	*	0.26	*	0.27	*
Population, closeness2	0.45	*	0.45	*	0.45	*	0.44	*
Rang, betweenness2	-0.2	*	-0.2	*	-0.2	*	-0.2	*
Rang, eigen centrality	-0.09		-0.09		-0.09		-0.09	
Rang, closeness2	-0.36	*	-0.35	*	-0.36	*	-0.35	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

*Résultats des corrélations pour le réseau invariant d'échelle homogène (distance-temps) \* valeur significative*

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.53	*	0.53	*	0.53	*	0.53	*
Échange, eigen centrality	0.31	*	0.29	*	0.31	*	0.29	*
Échange, closeness2	0.21	*	0.21	*	0.22	*	0.21	*
Recoit , betweenness2	0.54	*	0.53	*	0.55	*	0.53	*
Recoit , eigen centrality	0.31	*	0.29	*	0.31	*	0.29	*
Recoit , closeness2	0.22	*	0.22	*	0.22	*	0.22	*
Population, betweenness2	0.52	*	0.53	*	0.54	*	0.52	*
Population, eigen centrality	0.31	*	0.28	*	0.31	*	0.27	*
Population, closeness2	0.21	*	0.21	*	0.22	*	0.21	*
Rang, betweenness2	-0.2	*	-0.19		-0.19	*	-0.19	
Rang, eigen centrality	-0.14		-0.14		-0.15		-0.14	
Rang, closeness2	-0.16		-0.14		-0.16		-0.14	
Population, échange	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.98	*
Rang, classement	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.98	*

*Résultats des corrélations pour le réseau invariant d'échelle hétérogène (distance-temps) \* valeur significative*

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.14		0.12		0.12		0.14	
Échange, eigen centrality	-0.04		-0.04		-0.04		-0.04	
Échange, closeness2	0.06		0.07		0.06		0.08	
Recoit , betweenness2	0.14		0.12		0.12		0.14	
Recoit , eigen centrality	-0.04		-0.04		-0.04		-0.05	
Recoit , closeness2	0.06		0.07		0.06		0.08	
Population, betweenness2	0.14		0.12		0.11		0.15	
Population, eigen centrality	-0.04		-0.04		-0.03		-0.05	
Population, closeness2	0.06		0.06		0.05		0.1	
Rang, betweenness2	-0.15		-0.13		-0.11		-0.16	
Rang, eigen centrality	0.04		0.04		0.03		0.04	
Rang, closeness2	-0.06		-0.07		-0.05		-0.11	
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau Small world homogène (distance-temps) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.29	*	0.34	*	0.29	*	0.30	*
Échange, eigen centrality	-0.03		-0.02		-0.03		-0.03	
Échange, closeness2	0.18	*	0.24	*	0.18		0.18	
Recoit , betweenness2	0.36	*	0.38	*	0.35	*	0.36	*
Recoit , eigen centrality	-0.03		-0.02		-0.02		-0.03	
Recoit , closeness2	0.24	*	0.28	*	0.24	*	0.24	*
Population, betweenness2	0.31	*	0.35	*	0.29	*	0.32	*
Population, eigen centrality	-0.03		-0.02		-0.03		-0.03	
Population, closeness2	0.20	*	0.26	*	0.18		0.20	*
Rang, betweenness2	-0.39	*	-0.4	*	-0.38	*	-0.4	*
Rang, eigen centrality	0.01		0		0.01		0.02	5
Rang, closeness2	-0.26	*	-0.3	*	-0.25	*	-0.26	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau Small world hétérogène (distance-temps) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.32	*	0.30	*	0.31	*	0.32	*
Échange, eigen centrality	0.02		0.01		0.02		0.01	
Échange, closeness2	0.31	*	0.31	*	0.31	*	0.31	*
Recoit , betweenness2	0.32	*	0.30	*	0.31	*	0.31	*
Recoit , eigen centrality	0.02		0.01		0.02		0.01	
Recoit , closeness2	0.31	*	0.31	*	0.31	*	0.31	*
Population, betweenness2	0.32	*	0.3	*	0.31	*	0.31	*
Population, eigen centrality	0.02		0.02		0.02		0	
Population, closeness2	0.31	*	0.31	*	0.31	*	0.31	*
Rang, betweenness2	-0.29	*	-0.28	*	-0.3	*	-0.29	*
Rang, eigen centrality	-0.03		-0.02		-0.04		0	
Rang, closeness2	-0.37	*	-0.39	*	-0.37	*	-0.39	*
Population, échange	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.99	*	0.99	*	0.99	*

Résultats des corrélations pour le réseau aléatoire homogène (distance-temps) \* valeur significative

Population initiale	50				100			
Taux de migration	1		2		1		2	
Corrélation		pvalues		pvalues		pvalues		pvalues
Échange, betweenness2	0.26	*	0.25	*	0.25	*	0.24	*
Échange, eigen centrality	-0.04		-0.03		-0.04		-0.04	
Échange, closeness2	0.24	*	0.24	*	0.23	*	0.23	*
Recoit , betweenness2	0.24	*	0.24	*	0.24	*	0.23	*
Recoit , eigen centrality	-0.04		-0.03		-0.04		-0.03	
Recoit , closeness2	0.23	*	0.23	*	0.22	*	0.23	*
Population, betweenness2	0.26	*	0.23	*	0.25	*	0.23	*
Population, eigen centrality	-0.04		-0.03		-0.04		-0.02	
Population, closeness2	0.25	*	0.24	*	0.23	*	0.23	*
Rang, betweenness2	-0.26	*	-0.23	*	-0.25	*	-0.23	*
Rang, eigen centrality	0.02		0.03		0.02		0.03	
Rang, closeness2	-0.29	*	-0.28	*	-0.28	*	-0.28	*
Population, échange	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.99	*
Rang, classement	0.99	*	0.98	*	0.99	*	0.99	*

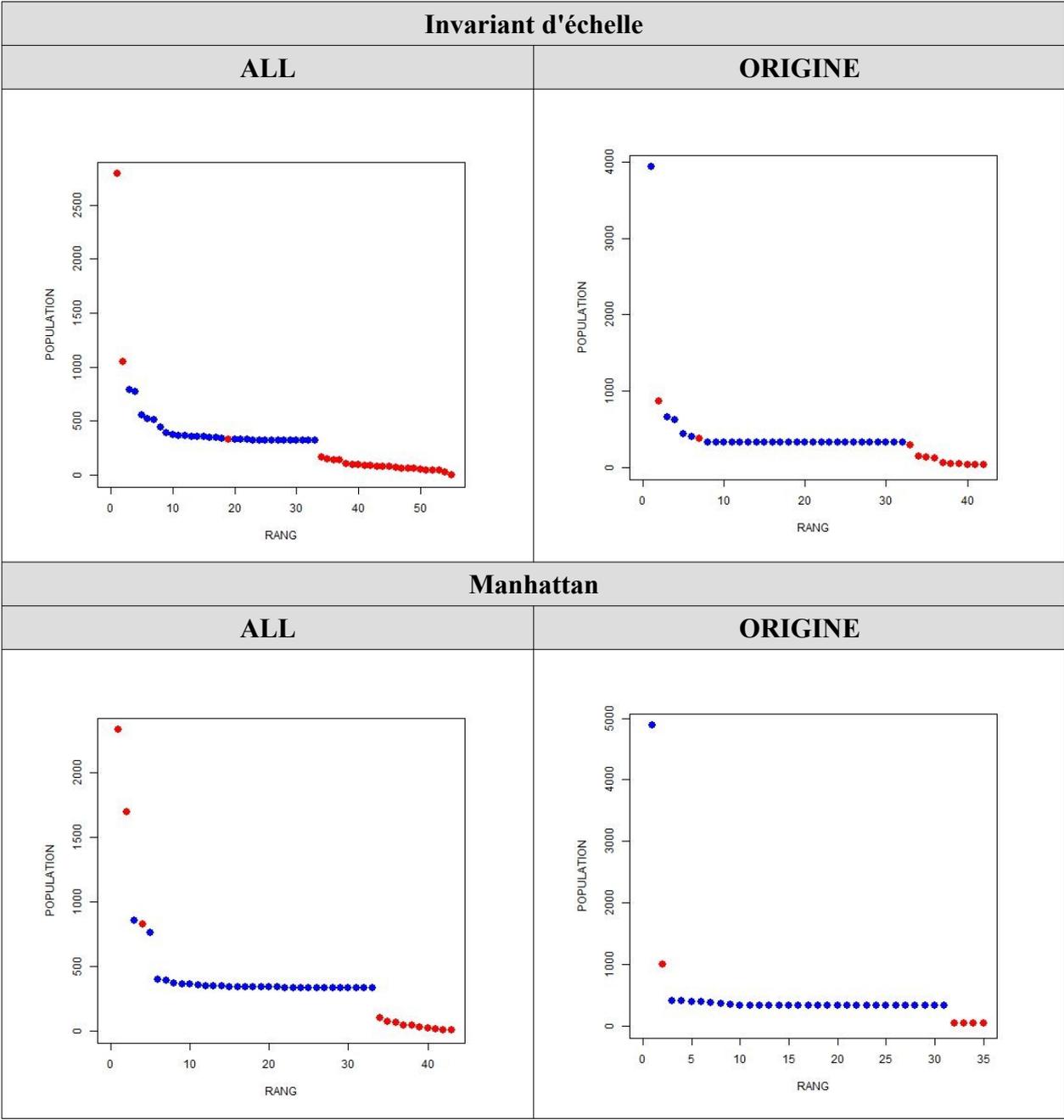
Résultats des corrélations pour le réseau aléatoire hétérogène (distance-temps) \* valeur significative

Annexe C : Comparaison aux modèles théoriques (modélisation sans émergence de villes)

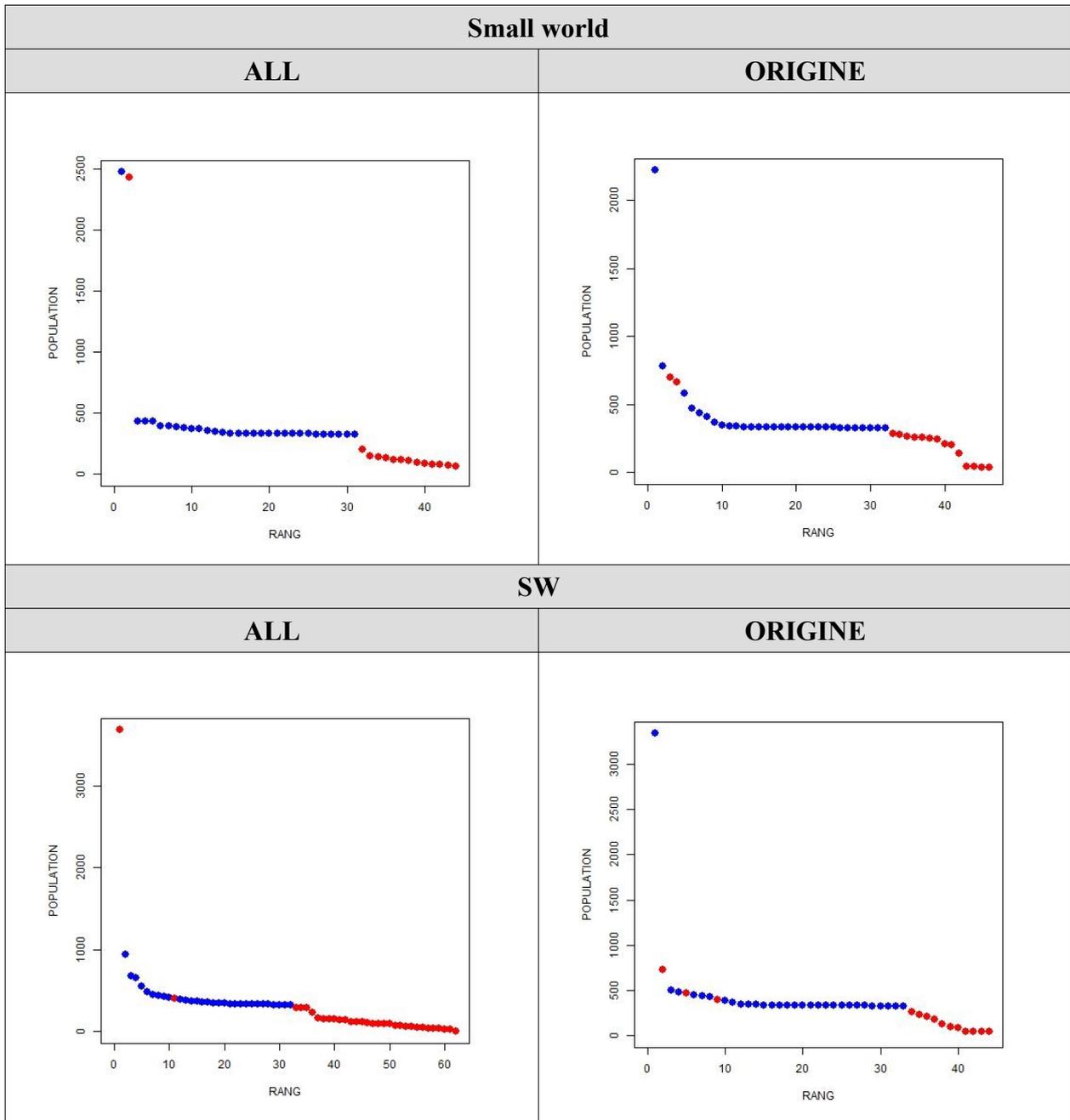
Réseau	Taux migration	Somme des écarts à Zipf (en milliers) en valeur absolue	Ratio entre la taille de la première et dernière ville (simulé)	Ratio entre la taille moyenne du premier décile et la taille moyenne du dernier décile (simulé)
Invariant d'échelle	1	15	9	5
Invariant d'échelle	2	23	13	8
Manhattan	1	16	4	3
Manhattan	2	25	9	8
Small world	1	15	2	2
Small world	2	22	4	4
SW	1	15	3	3
SW	2	22	5	5

*Comparaison au modèle théorique (modalisation sans émergence de nouvelles villes, mais avec les mêmes paramètres d'interaction).*

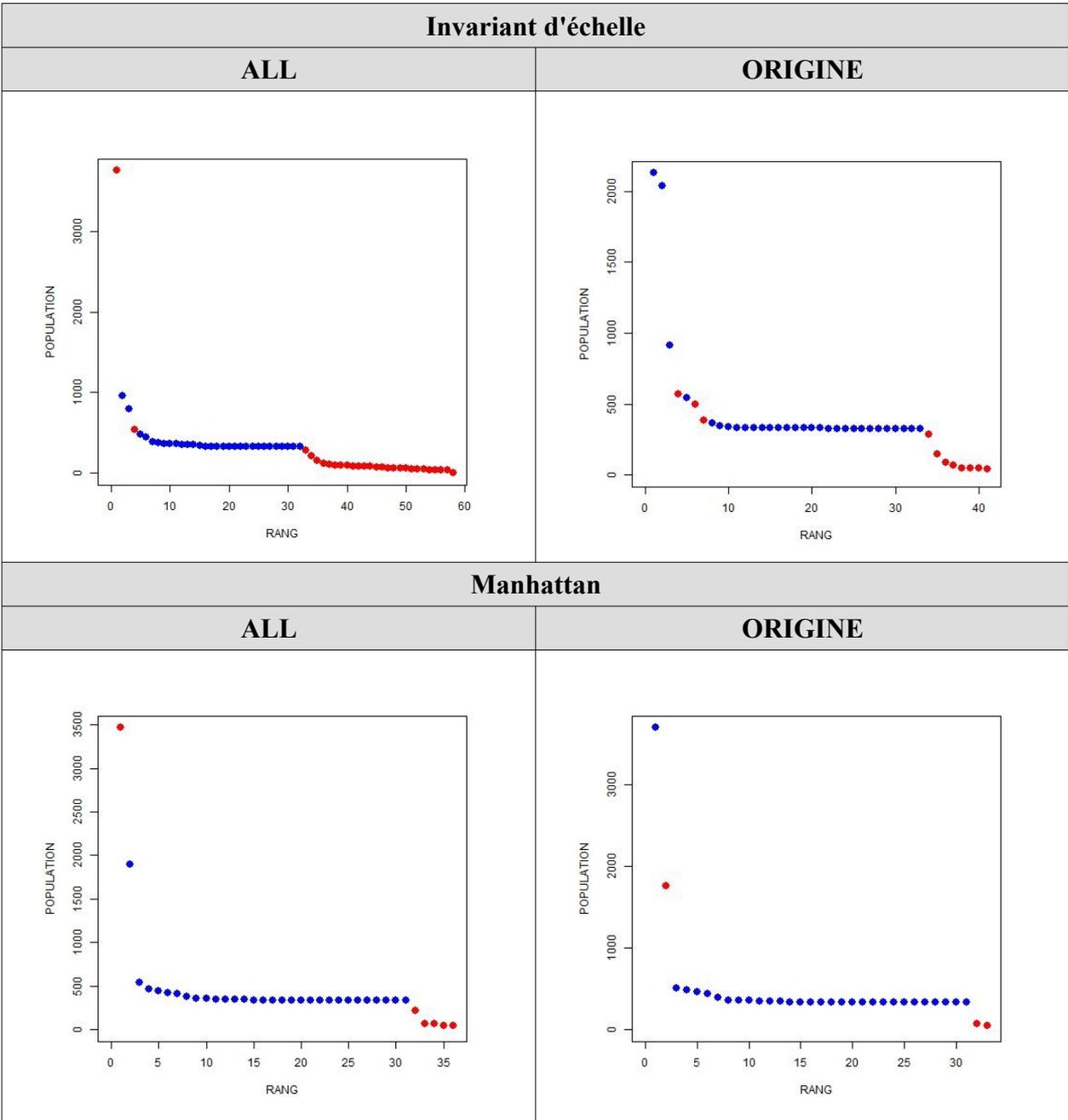
Annexe D : Localisation hiérarchique des villes émergentes



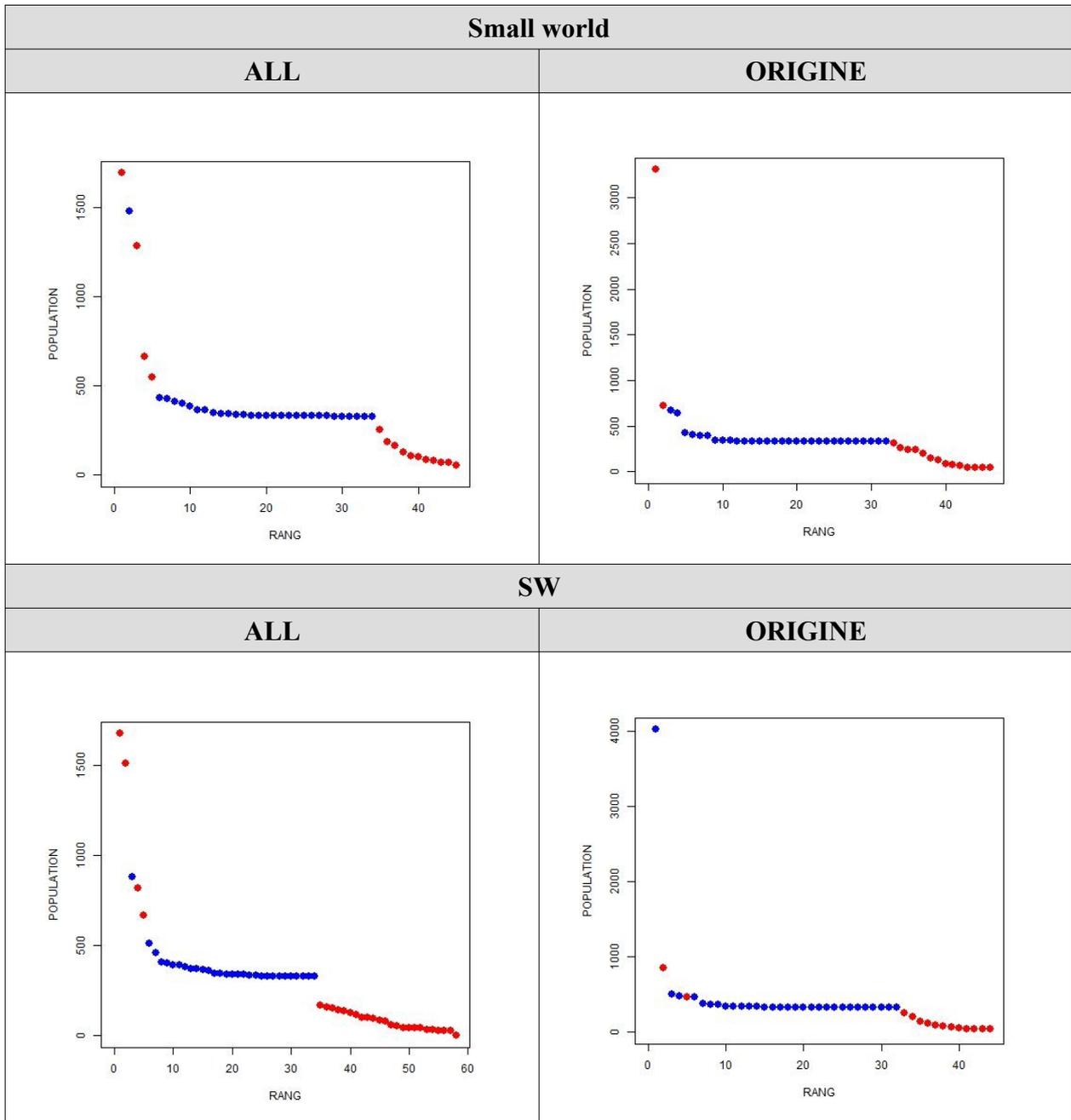
Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour les réseaux Invariant d'échelle et de Manhattan (migration :1%, seuil émergence 7%, probabilité d'émergence de nouveaux arcs : nulle)



*Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour les réseaux Small World et de SW (migration : 1%, seuil émergence : 7%, probabilité d'émergence de nouveaux arcs : nulle)*



*Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour les réseaux Invariant d'échelle et de Manhattan (migration : 1%, seuil émergence : 7%, probabilité d'émergence de nouveaux arcs : 50%)*



*Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour les réseaux Small World et de SW (migration : 1%, seuil émergence : 7%, probabilité d'émergence de nouveaux arcs : 50%)*

## Annexe E : Nombre de villes émergentes dans le « top 5 »

Paramètres	Réseau invariant d'échelle	Réseau Manhattan	Réseau small world	Réseau SW
	Probabilité nulle d'émergence nouveaux arcs			
	Mode d'interaction : ALL			
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	2	3	1	1
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	1	3	2	0
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	2	2	2	3
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	3	1	2	1
	Mode d'interaction : ORIGINE			
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	1	1	2	2
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	1	1	2	1
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	2	1	1	2
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	1	1	2	2
	Probabilité de 50% d'émergence nouveaux arcs			
	Mode d'interaction : ALL			
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	2	1	4	4
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	1	4	1	1
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	3	2	3	4
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	4	1	2	1
	Mode d'interaction : ORIGINE			
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 7%	1	1	2	2
Taux migration : 1% Seuil d'émergence : 10%	1	0	2	2
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 7%	2	0	2	2
Taux migration : 2% Seuil d'émergence : 10%	1	1	3	2

*Nombre de villes émergentes dans le « top 5 »*

Annexe F : Comparaison globale des potentiels d'interactions entre villes initiales et villes émergentes

Paramètres	Émergence nulle Interaction : ALL		Émergence nulle Interaction :ORIG INE		Émergence 50% Interaction : ALL		Émergence 50% Interaction :ORI GINE	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Catégories								
Betweenness villes de départ	7	12	4	6	12	15	7	10
Betweenness villes nouvelles	3	6	1	2	2	6	3	4
Closeness villes de départ	32	36	20	23	27	34	21	23
Closeness villes nouvelles	21	24	10	13	14	23	13	19
Eigenvector centrality villes de départ	23	30	19	21	21	27	20	22
Eigenvector centrality villes nouvelles	23	31	21	25	24	32	17	23

*Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (réseau Invariant d'échelle)*

Paramètres	Émergence nulle Interaction : ALL		Émergence nulle Interaction : ORIGINE		Émergence 50% Interaction : ALL		Émergence 50% Interaction : ORIGINE	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Catégories								
Betweenness villes de départ	18	20	18	18	17	18	17	17
Betweenness villes nouvelles	27	39	17	20	21	25	18	26
Closeness villes de départ	18	21	17	17	18	18	17	18
Closeness villes nouvelles	35	37	17	17	18	22	12	22
Eigenvector centrality villes de départ	25	36	20	20	21	23	18	22
Eigenvector centrality villes nouvelles	8	24	4	4	5	6	4	5

*Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (réseau Manhattan)*

Paramètres	Émergence nulle Interaction : ALL		Émergence nulle Interaction : ORIGINE		Émergence 50% Interaction : ALL		Émergence 50% Interaction : ORIGINE	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Catégories								
Betweenness villes de départ	16	19	20	22	13	19	16	17
Betweenness villes nouvelles	13	20	15	17	21	23	19	22
Closeness villes de départ	17	19	19	21	20	22	19	21
Closeness villes nouvelles	21	29	25	27	27	21	23	30
Eigenvector centrality villes de départ	21	26	28	29	28	29	28	30
Eigenvector centrality villes nouvelles	12	14	14	18	12	17	13	14

*Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (réseau Small world)*

Paramètres	Émergence nulle Interaction : ALL		Émergence nulle Interaction : ORIGINE		Émergence 50% Interaction : ALL		Émergence 50% Interaction : ORIGINE	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Catégories								
Betweenness villes de départ	20	33	20	21	15	18	16	18
Betweenness villes nouvelles	23	37	21	23	30	34	24	26
Closeness villes de départ	19	29	18	22	19	21	18	19
Closeness villes nouvelles	22	36	22	24	29	37	25	29
Eigenvector centrality villes de départ	27	52	25	27	32	41	27	28
Eigenvector centrality villes nouvelles	11	27	11	14	11	18	9	10

*Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (réseau SW)*



## Bibliographie

- Allen P.M., Sanglier M., 1979, "A Dynamic Model of Growth in a Central Place System", *Geographical Analysis*, 11, pp. 256-272.
- 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. URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2014.0745>
- Arthur, B., 1989, "Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events", *The Economic Journal*, 99, pp. 116-131.
- Auerbach F., 1913, "Das Gesetz der Bevölkerungskonzentration", *Petermanns Geographische Mitteilungen*, Vol. 59, pp. 74-76.
- Axelrod R., 1997, "The Complexity of Cooperation : Agent--Based Models of Competition and collaboration". *Princeton Studies in Complexity*, Princeton University Press, New Jersey, 232p.
- Bairoch P., 1985, "De Jéricho à Mexico : villes et économie dans l'histoire". Paris : Gallimard, 706p.
- Banos A., 2013, "Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en Géographies et SHS". HDR. Université Paris 1.
- Banos A., Sanders L., 2012, "Vers une cartographie sémantique des modèles urbains : des individus aux systèmes de villes", *colloque Modélisation urbaine : de la représentation au projet*, Coll. Références, Commissariat Général au Développement Durable.
- Baptiste H., 1999, "Interactions entre le système de transport et les systèmes de villes : perspective historique pour une modélisation dynamique spatialisée". « Thèse de doctorat ». Centre d'études supérieures de l'aménagement (Tours).
- Barabási A.L., Albert R., 1999, "Emergence of scaling in random net-works". *Science*, 286(5439), pp. 509–512.
- Batty M., 1991, "Generating urban forms from diffusive growth". *Environment and Planning A* 23.4, pp. 511–544.
- Batty M., 2001, "Polynucleated urban landscapes", *Urban studies*, Vol. 38, No.4, pp. 635-655.
- Batty M., 2007, "Cities and complexity : understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals". *MIT press*.
- Bautier R.-H., 1960, "Recherches sur les routes de l'Europe médiévale", in *Bulletin philologique et historique des travaux historiques et scientifiques*. Tome 1 et 2.
- Bavelas A., 1948, "A mathematical model for group structures", *Human organization*, 7(3), p. 16-30.
- Beauguitte L., 2014, "C comme clustering coefficient", *groupe f.m.r.* URL : <https://groupefmr.hypotheses.org/3221>
- Behrens K., 2007, "On the location and lock-in of cities: Geography vs transportation technology", *Regional Science and Urban Economics*, 37, pp. 22-45.

- Belhedi A., 2001, " *À propos de la loi rang-taille : les impasses d'une mauvaise interprétation* ". Faculté des Sciences Humaines & Sociales, Université Tunis, 12p
- Benkirane R., 2006, " *La complexité, vertiges et promesses : 18 histoires de sciences* ", Paris, Édition le Pommier, pp. 95-116.
- Berger T., Enflo K., 2017, " Locomotives of local growth : The short-and long-term impact of railroads in Sweden ". *Journal of Urban Economics* 98, p. 124–138
- Berroir S., Cattan N., Dobruszkes F., Guérois M., Paulus F., Vacchiani-Marcuzzo C., 2017, " Les systèmes urbains français : une approche relationnelle ", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Espace, Société, Territoire, document 807, mis en ligne le 06 février 2017. DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27945>
- Berry B.J.L., 1964, Cities as systems within systems of cities ". *Papers in Regional Science* 13.1, pp. 147–163.
- Boiteux M., 2001, " Transports : Choix Des Investissements Et Coût Des Nuisances ". *La Documentation Française*, Commissariat Général du Plan, Paris
- Bourguine P., Lesne A., 2006. " *Morphogenèse - L'origine des formes* ", Collection : Echelles, édition Belin, 352 pages, pp. 239-263
- Bretagnolle A., 2003, " Vitesse et processus de sélection hiérarchique dans le système des villes françaises ". *Données urbaines*, Vol.4.
- Bretagnolle A., 2005, " Les villes dans l'espace-temps : vitesse des communications et structuration des territoires à l'échelle intra et interurbaine ". Volvey Anne. *Echelles et temporalités*, Atlande, pp.180-187, Clefs Concours: Géographie thématique. Halshs-00156880
- Bretagnolle A., Daudé E., Pumain D., 2006, " From theory to modelling: urban systems as complex systems ", *Cybergeo: European Journal of Geography*, 13e Colloque Européen de Géographie Théorique et Quantitative, Lucca, Italie, 8- 11 septembre 2003, Document 2420
- Bretagnolle A., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C., 2007, "Les formes des systèmes de villes dans le monde", in M.F Mattéi, D. Pumain (coord.), *Données Urbaines*, Vol 5, Paris, Economica, Collection Villes, p.301-314.
- Bretagnolle A., 2009, " *Villes et réseaux de transport : des interactions dans la longue durée (France, Europe, États-Unis)* ". Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2009. tel-00459720f
- Bretagnolle A., Pumain D., 2010, " Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents ". G. Weisbuch et A. Zwirn. *Qu'appelle t-on aujourd'hui les sciences de la complexité? Langages, réseaux, marchés, territoires*, Vuibert, pp.271-299, Philosophie des Sciences. fhalshs00159894v3f
- Brunet R., Dollfus O., 1990, " Mondes Nouveaux ". *Géographie Universelle* tome I, Hachette-Reclus, 79p
- Brunet R., Ferras R., Théry H., 1992, " *Les mots de la géographie, dictionnaire critique* ". Reclus. La Documentation Française, 470p.
- Brunet R., 2000, " Des modèles en Géographie ? Sens d'une recherche ", *BSGLg* [En ligne], 39 (2000/2) - Varia, URL : <https://popups.uliege.be:443/0770-7576/index.php?id=2527>.

- Cauvin C., Reymond H., Schaub G., 1989, " Accessibilité, temps de séjour et hiérarchie urbaine: l'exemple du réseau aérien pour 53 villes d'Europe de l'Ouest ". *Sistemi urbani*, 3, pp.297-324.
- Chamussy H., 2004, "Modèle", *Hypergéométrie*. URL : <https://www.hypergeo.eu/spip.php?article9>
- Christaller W., 1933, " *Central Places in Southern Germany* ", *Englewood Cliffs* (N.J.), Prentice-Hall.
- Combes P., Mayer T., Thisse J-F., 2006, " *Economie géographique* ", Economica, Paris
- Cottineau C., 2014, " *L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations* ". « Thèse de doctorat ». Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- Cronon W., 1991, " Nature's metropolis : Chicago and the Great West ", *Norton W. and Company* ltd, New York.
- Crozet Y., Joly I., 2004, " Budgets temps de transport : les sociétés tertiaires confrontées à la gestion paradoxale du "bien le plus rare" ". *Les Cahiers scientifiques du transport*, AFITL., pp. 27-48.halshs-00068933v2
- Damette F., 1994, " La France en villes ", Paris, DATAR, *La Documentation française*, 271 p.
- Dauphiné A., 2003, " *Les théories de la complexité chez les géographes* ", Paris, éditions Economica, collection Anthropos, 199p.
- Deffuant G., Banos A., Chavalarias D., Bertelle C., Brodu N , *et al.*, 2015, " Visions de la complexité. Le démon de Laplace dans tous ses états ". *Natures Sciences Sociétés*, EDP Sciences, 2015, 23 (1), pp.42-53. 10.1051/nss/2015007. Hal-01167299
- Drevelle M., 2013a, " I comme indice(s) ", *groupe f.m.r.* URL : <https://groupefmr.hypotheses.org/1605>
- Drevelle M., 2013b, " C comme centralité(s) ", *groupe f.m.r.* URL : <https://groupefmr.hypotheses.org/2324>
- Dimou M., Schaffar A., 2011, " Les théories de la croissance urbaine ". *Revue d'Economie Politique*, Dalloz, 121 (2), pp.179--207.
- Ducruet C., 2010, " *Les mesures locales d'un réseau* ". halshs-00546814, version 2.
- Durand-Dastes F., 1974, " Sur l'utilisation des modèles en géographie ", *Bulletin de l'AGF*, n° 413-414, pp 43-50.
- Durand-Dastès F., 2001, " Les concepts de la modélisation en analyse spatiale ", in Sanders L., *Modèles en analyse spatiale*, Hermès, Lavoisier, pp. 31-57.
- Duranton G., Turner M A, 2012, " Urban Growth and Transportation ", *Review of Economic Studies*, 79(4) : 1407-1440.
- Eber N., 2004, " *Théorie des jeux* ", Paris, Dunod, pp 16.
- Edmonds B., Moss S., 2005, " From KISS to KIDS in Multi-Agent and Multi-Agent Based Simulation ", *Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3415/2005, pp.130--144.
- Epstein J., Axtell R., 1996, " *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up (Complex Adaptive Systems)* ", The MIT Press.

- Epstein J., 2006, " *Generative social science : Studies in agent-based computational modeling* ". Princeton University Press.
- Epstein J., 2008, " Why model ? ". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11.4, 12p.
- Farber S., Neutens T., Carrasco J.-A., Rojas C., 2014, " Social Interaction Potential and the Spatial Distribution of Face-to-Face Social Interactions v. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(6), pp. 960–976. <https://doi.org/10.1068/b120034p>
- Ferber J., 1995, " *Les Systèmes Multi-agents, Vers une intelligence collective* ", Paris, InterEditions, 513p.
- Forrester J.W., 1969, " *Urban Dynamics* ", M.I.T. Press, Cambridge, Mass..
- Fotheringham A.S., O’Kelly M.E., 1989, " Spatial Interaction Models : Formulations and Applications ", *Kluwer Academic Publishers*, London, 221p.
- Fournier G., Scarsini M., 2019, "Location Games on Networks: Existence and Efficiency of Equilibria "; *Mathematics of Operations Research*, 44(1), 212-235
- Fujita M., Krugman P., 1995, " When is the economy monocentric? Von Thünen and Chamberlin unified ", *Regional Science and Urban Economics* 25, pp. 505-528.
- Fujita M., Krugman P., Venables C., 1999, " *The spatial economy* ", MIT Press, Cambridge.
- Gabaix X., 1999a, " Zipf’s Law and the Growth of Cities ". In : *The American Economic Review* 89.2, pp. 129-132.
- Gabaix X., 1999b, " Zipf’s law for cities : an explanation ". In : *The Quarterly Journal of Economics* 114.3, pp. 739-767.
- Gabaix X., Ioannides Y., 2004, " The evolution of city size distributions ". In : *Handbook of regional and urban economics*, pp. 2341-2378
- Galland S., 2001, " *Approche multi-agents pour la conception et la construction d’un environnement de simulation en vue de l’évaluation des performances des ateliers multi-sites* " Système multi-agents[cs.MA]. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2001. Français. NNT: 2001EMSE0024. Tel-00841382
- Genre-Grandpierre, C., 2007, " Des « réseaux lents » contre la dépendance automobile ? Concept et implications en milieu urbain ", *L’Espace géographique*, vol. tome 36, no. 1, pp. 27-39.
- Genre-Grandpierre, C., 2014, " *Vitesse de déplacement et durabilité en milieu urbain. La possibilité d’une métrique* », Université d’Avignon et des Pays de Vaucluse.
- Gibrat R., 1931, " *Les inégalités économiques* ". Librairie du Recueil Sirey, 296p.
- Glaeser E., Kallal H., Scheinkman J. A., Shleifer A., 1992, " Growth in cities ", *Journal of Political Economy*, Vol. 100, No. 6, pp. 1126-1152,
- Glaeser E., 2011, " *Triumph of the City: How Our Greatest Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier* ", the Penguin Press, 358p.
- Glaeser E., 2012, " The challenge of urban policy ". *Journal of Policy Analysis and Management*. 31. 10.2307/41429261.

- Gleyze J-F., 2001, " *Réseau, Territoires et Accessibilité* ", Rapport interne au laboratoire COGIT, IGN, Saint-Mandé, version 1, 136 p
- Gleyze J-F., 2007, " Effets spatiaux et effets réseau dans l'évaluation d'indicateurs sur les nœuds d'un réseau d'infrastructure ", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 370, URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/5532> ; DOI : 10.4000/cybergeo.5532
- Grasland C., 2010, " Les mécanismes démographiques de la décroissance : trois boucles de rétroaction " in Baron M., Cunningham-Sabot E., Grasland C., Rivière D., Van Hamme G., *Villes et régions européennes en décroissance*, Paris, Lavoisier, Série Aménagement et Gestion du territoire, pp. 97-116.
- Grimaud F., 1996, " *Conception D'une Base de Composants Logiciels Pour L'évaluation Des Performances Des Entreprises Manufacturières* ". « Thèse de doctorat », Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Haggett P., 1965, " *Locational Analysis in Human Geography* ". London : Edward Arnold.
- Haggett P., Chorley R., Arnold E., 1969, " *Network analysis in geography* ", London, 348 p
- Handy S.L., Niemeier D.A., 1997, " Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives ". *Environment and Planning A*, 29, pp. 1175-1194
- Hebb D.O., 1949, " *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory* ", Wiley, New York.
- Henderson V., 1974, " The size and types of cities ", *American Economic Review*, 64, pp; 640-56.
- Henderson V., 1988, " *Urban Development : theory fact and illusion* ", Oxford University Press.
- Heudin J-C., 1998, " *L'évolution au bord du chaos* ", Paris, Hermès, 42 p
- Huriot J-M., Perreur J., 1994, " Espace et distance ", p 35-46 in *Encyclopédie d'économie spatiale*, op cit ? 55P
- Kansky K., 1963, " *Structure of transport networks : relationships between network geometry and regional characteristics* ", university of Chicago, Research Papers 84, 156 p.
- Kansky K., 1989, " Measures of Network Structure ", *Flux*, No.spécial 1989, 93-121 DOI : 10.3406/flux.1989.913
- Kohler T.A., Johnson C.D., Varien M., Ortman S., Reynolds R., Kobti Z., Cowan J., Kolm K., Smith S., Yap L., 2007, " Settlement ecodynamics in the prehispanic central Mesa Verde region ", in Kohler T. A., van der Leeuw S. (eds.), *The model-based archaeology of socionatural systems*, 61–104, SAR Press, Santa Fe, NM
- Krugman P., 1991, " History vs expectations ", *Quarterly Journal of economics*, 106, 651-667
- Krugman P., 1993, " First nature, second nature and metropolitan location ", *Journal of Regional Science*, 33, pp. 129-144.

- Krugman P., 1996, " Confronting the Mystery of Urban Hierarchy ", *Journal of the Japanese and the International Economies*, 10, pp. 399-418.
- Ledent J., 1993, " Théories et modèles de l'urbanisation : un survol ", Publications de l'AIDELF – *Carrefour de la démographie francophone. Croissance démographique et urbanisation* (Actes du colloque de Rabat, 1990)
- Levinson DM., Kumar A., 1997, " Density and the journey to work ". *Growth Change*.; 28(2), pp. 147-172.
- Levy J, Lussault M., 2013, " *Dictionnaire de la Géographie et de espace des sociétés* ". Paris Belin, 1128p
- Lussault M., 2010, "L'urbanisation, horizon du monde". *Datar/Documentation Française*, 2010, pp.59-64
- Marshall A., 1890, " *Principles of Economics* ", Macmillan, London.
- Maslow A. H., 1943, " A theory of human motivation ". *Psychological Review*, 50(4), pp. 370-396. <https://doi.org/10.1037/h0054346>
- MatSim., 2016, " *Multi-Agent Transportation Simulation* ", webpage, URL : <http://www.matsim.org>.
- Milgram, S., 1967, " The Small World Problem ". *Psychology Today*. Ziff-Davis Publishing Company.
- Mimeur C., 2016, " *Les traces de la vitesse entre réseau et territoire : approche géohistorique de la croissance du réseau ferroviaire français* ", « Thèse de doctorat », Géographie. Université de Bourgogne. tel-01451164v2
- Mimeur C., et al., 2017, " Revisiting the structuring effect of transportation infrastructure : an empirical approach with the French Railway Network from 1860 to 1910 ". *Historical Methods : A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*.
- Nicolas G., Radeff, A., 2012, " *Hiérarchies des villes : des « lois » taillées sur mesure* ", 4p
- Offner J-M., 1993, "Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique". *Espace géographique* 22.3, pp. 233- 242.
- Offner J-M., Pumain D., 1996, " *Réseaux et territoires - significations croisées* ". Offner J-M., Pumain D. (dirs). Editions de l'Aube, pp.281. ⟨halshs-00438903⟩
- Oswalt P., 2006, " *Shrinking Cities* ", Vol 1, International Research, Ostfildern, Hatje Cantz, 735p.
- Ottaviano G., 2008, " *Infrastructure and economic geography: an overview of evidence* ", EIB Papers, les documents d'évaluation de l'impact économique et social du Grand Paris Express.
- Paulet JP., 2010, " *La France : villes et systèmes urbains* ". Armand Colin, « U », 2010, 224 pages. ISBN : 9782200248246. DOI : 10.3917/arco.paule.2010.01. URL : <https://www.cairn.info/la-france-villes-et-sytemes-urbains--9782200248246.htm>
- Paulus F., 2004, " *Coévolution dans les systèmes de villes: croissance et spécialisation des aires urbaines françaises de 1950 à 2000* ", « Thèse de doctorat », Université Paris 1, 407p.

- Perez P *et al.* 2016. " Agent-Based Modelling for Urban Planning Current Limitations and Future Trends ". *International Work- Bibliographie 521 shop on Agent Based Modelling of Urban Systems*. Springer, pp. 60- 69.
- Plassard, F., 1977, " *Les autoroutes et le développement régional* ". Presses Universitaires de Lyon.
- Prigorine I., Allen PM., Herman P., 1977, " Long term trends ans the evolution of complexity" in Laszlo, E.and Bierman, J.(eds.) : 1977, *Goals in a Global Community. A report to the Club of Rome*, Voll1, Pergamon Press, New York, Toronto, Oxford, Sydney, Frankfurt and Paris
- Prud'homme R., Lee C-W., 1999, " *Size, Sprawl, Speed and the Efficiency of Cities* ", pp. 1849-1858
- Pumain D., 1982, " *La dynamique des villes* ", Paris, Economica, 231p
- Pumain, D., 1997, " Pour une théorie évolutive des villes ". *Espace géographique* 26.2, pp. 119–134
- Pumain, D., Moriconi-Ebrard F., 1997, " City size distributions and metropolisation ". In : *Geojournal* 43.4, pp. 307–314
- Pumain, D., 1998, " Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain ". *Cahiers de géographie du Québec*, 42 (117), Département de géographie de l'Université Laval, pp 349–366. halshs-01565291
- Pumain D., Bretagnolle A., Rozenblat C., 1999, " Croissance et sélection dans le système des villes européennes(1600-2000) ". In: *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, vol. 26, n°101-104, 1999. Temporalités spatiales. pp. 105-136;doi : <https://doi.org/10.3406/tigr.1999.1388>
- Pumain D., 2003, " Une approche de la complexité en géographie ", *Géocarrefour*, n°78 voll, pp. 25-31
- Pumain D., 2004, " Processus ", *Hypergéo*. URL : <https://www.hypergeo.eu/spip.php?article99>
- Pumain D., 2006, " Systèmes de villes et niveaux d'organisation ". P. Bourguine, A. Lesne. Morphogenèse. *L'origine des formes*, Belin, Echelles, pp.239-263, halshs-00145939
- Pumain D., Paquot T., Kleinschmager R., 2006, " *Dictionnaire La Ville et l'Urbain* ", Anthropos-Economica, collection Villes, 320p. Halshs-00266515
- Pumain D., 2008, " The socio-spatial dynamics of systems of cities and innovation processes : a multi-level model ". *The Dynamics of Complex Urban Systems*, pp. 373–389.
- Pumain D., Paulus F., Vacchiani-Marcuzzo C., 2009 " Innovation Cycles and Urban Dynamics " in D.Lane, D. Pumain, S. Van der Leeuw, G. West (ed.), *Complexity perspectives on innovation and social change*, chapter 8, ISCOM, Springer, Methodos Series, p.237-260.
- Pumain D., 2010, " Une théorie géographique des villes ". *Bulletin de la Société géographique de Liège* 55, p. 5–15.
- Pumain D., Saint-Julien T., 2010, " *Analyse spatiale : les interactions* ". 2eme édition 2010, Armand Colin, Cursus Géographie, 224p

- Pumain D., 2012a, " Multi-agent system modelling for urban systems : The series of SIMPOP models ". *Agent-based models of geographical systems*. Springer, p. 721–738.
- Pumain. D., 2012b, " Une théorie géographique pour la loi de Zipf ". *Région et Développement* n°36 , 32p
- Pumain, D., Sanders L., 2013, " Theoretical principles in interurban simulation models : a comparison ". *Environment and Planning A* 45.9, pp. 2243-2260.
- Pumain D., Reuillon R., Chapron P., Chérel G., Cottineau C., *et al.*, 2017, " *Urban Dynamics and Simulation Models* ". {hal-01891927}
- Pumain, D., Romain R., 2017a, " An Incremental MultiModelling Method to Simulate Systems of Cities' Evolution ". *Urban Dynamics and Simulation Models*. Springer, pp. 57–80.
- Pumain D., 2020, "Theories and Models of Urbanization: Geography ", *Economics and Computing Sciences*, Springer; 1 edition, 330p
- Raimbault J., 2018, " *Caractérisation et modélisation de la co-evolution des réseaux de transport et des territoires* ". « Thèse de doctorat ». Université Paris 7 Denis Diderot, Français. Tel-01857741
- Reilly W. J., 1931, " *The law of retail gravitation* ", New York.
- Reiner TA., Parr JB., 1980, " A note on the dimension of a national settlement sattern ". *Urban Stud* 17(3), pp. 223-230
- Renouard Y., 1962, " Routes, étapes et vitesses de marche de France à Rome aux 13ème et 14ème siècles ", in *Studi A. Fanfani*, Milan, Tome 3.
- Reynaud J., 1841, " Villes ", in *Encyclopédie Nouvelle*, t. VIII, pP. 670-687
- Robic M-C., 1982, " Cent ans avant Christaller... une théorie des lieux centraux ". *Espace géographique* 11.1, pp. 5-12.
- Rollier Y., Wiel M., 1993, " La pérégrination au sein de l'agglomération : Constats à propos du site de Brest ". In: *Les Annales de la recherche urbaine*, N°59-60,. Mobilités. pp. 152-162
- Rosen, K., Resnick, M., 1980, " The size distribution of cities: an examination of the Pareto law primacy ", *Journal of Urban Economics*, 8, 165-186.
- Rozenblat C., 2004, " *Tissus de villes, Réseaux et systèmes urbains en Europe* ", Rapport de synthèse de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Montpellier, Université Paul Valéry.
- Saassen S., 1996, " *The Global City: New York, London, Tokyo* ". Princeton New Jersey : Princeton University Press
- Sanders L., Pumain D., Mathian H., Guerin-Pace F., Bura S., 1997, " Simpop: a multiagent system for the study of urbanism ", *Environment and Planning B*, Vol. 24, pp. 287-306.
- Sanders L., 2001, " Modèles en analyse spatiale: introduction ". Hermes Lavoisier, *Information Géographique et Aménagement du Territoire*, pp.17-29
- Sanders L., 2006, " Les modèles agent en géographie urbaine ". Amblard F., Phan D. *Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Hermes-Lavoisier, pp.151-168, halshs-00119088

- Sanders L., Favaro J.-M., Glisse B., Mathian H., Pumain D., 2007, " Artificial intelligence and collective agents: the EUROSIM model ", *Cybergeo : European Journal of Geography*, 392.
- 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.
- Schaffar A., 2009, " *Croissance et hiérarchie urbaines dans les pays émergents* ", « Thèse de doctorat », soutenu publiquement le 20 octobre 2009 à l'université du Sud Toulon-Var), 171p.
- Schelling Th. C., 1971, " Dynamic Models of Segregation ", *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, no. 2, pp. 143-186.
- Schelling Th. C., 2007, " *Les macroeffets de nos microdécisions* ", Paris Dunod, Quai des Sciences économique, 234 p.
- Schmitt C., Pumain D., 2013, " Modélographie multi-agents de la simulation des interactions sociétés-environnement et de l'émergence des villes ", *Cybergeo : European Journal of Geography*
- Schmitt C., 2014, " *Modélisation de la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet* ". « Thèse de doctorat » Géographie. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2014. Français
- Statistiques des transports, CGDD/SOeS., 2016, " *Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans* ", Document édité par : Le service de l'observation et des statistiques (SoeS). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-6-infrastructures-lineaires-transport-decembre2016-c.pdf>
- Tannier C., 2017, " *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. HDR. Université Bourgogne Franche-Comté.
- Thünen (von) J.H., 1842, " *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie* ", Rostock, Leopold.
- Tobler, W., 1970, " A computer movie simulating urban Growthn in th detroit region ". *Economic geography*, 46(2), pp.234–240.
- Trénard L., 1959, " De la route royale à l'âge d'or des diligences ", in Michaud G. (ed), *Les routes de France depuis les origines jusqu'à nos jours*, Paris, *Colloque des Cahiers de Civilisation*.
- Trolliet T., Cohen N., Giroire F., Hogie L., Pérennes S., 2020, " Coefficient de Clustering d'intérêt : une nouvelle métrique pour les graphes dirigés comme Twitter ". *ALGOTEL 2020-22èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications*, Sep 2020, Lyon, France. hal-02872779
- Urry, J., 2002, " Mobility and Proximity ". *Sociology*, 36(2), pp. 255–274.
- Varenne F., 2010, " Les simulations computationnelles dans les sciences sociales ". *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales 5.2*, 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* ", 644p.
- Véron J., 2007, " La moitié de la population mondiale vit en ville ", *Population et Sociétés* n° 435, 4p.
- Vidal de la Blache P., 1911, " La relativité des divisions régionales ". *Athéna (Conférence à l'Ecole des Hautes Etudes sociales)*.
- Weidlich W., Haag G., 1988, " *Interregional migration, Dynamic theory and comparative analysis* ", Berlin, Springer Verlag.
- Von Bertalanffy, L., 1968, " *General System Theory: Foundations, Development* ". New York: George Braziller
- Zahavi Y., Antti T., 1980, " Regularities in travel time and money expenditures ". *Transportation Research Record*, n° 750, pp. 13-19.
- Zipf G.K., 1949, " *Human Behavior and the Principle of Least Effort* ", Addison-Welsey, Cambridge, MA.

## Index des Illustrations

### Index des illustrations

Figure 1: Principe de variation-stabilisation (Heudin, 1998).....	24
Figure 2: Approche différentielle et complémentaire en systémique.....	24
Figure 3: Distribution hiérarchique théorique selon Zipf de la France en 2017 (en ordonnée la population, en abscisse le rang ) selon l'INSEE.....	26
Figure 4: Classification des approches de modélisation des modèles présentés (selon la classification de Schmitt et Pumain (Schmitt, Pumain, 2013)).....	39
Figure 5: Quelles sont les règles transitoires pour passer de A à B ?.....	45
Figure 6: Questionnements.....	46
Figure 7: Diagramme de classe (modèle aléatoire).....	51
Figure 8: Diagramme d'activité (modèle aléatoire).....	52
Figure 9: Diagramme de classe (modèle contribution).....	54
Figure 10: Diagramme de séquence (calcul de la contribution aux interactions).....	55
Figure 11: Comparaison aux distributions théoriques (modèle aléatoire). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi.....	59
Figure 12: Distribution hiérarchique (modèle contribution). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi.....	61
Figure 13: Moyenne des taux de variations des villes selon leur rang (modèle aléatoire).....	63
Figure 14: Moyenne des taux de variations des villes selon leur rang (modèle contribution).....	64
Figure 15: Distribution graphique des principales relations statistiques (modèle aléatoire).....	66
Figure 16: Distribution graphique des principales relations statistiques (modèle contribution).....	67
Figure 17: Diagramme de classe du modèle d'interaction spatiale.....	71
Figure 18: Diagramme d'activité du modèle d'interaction spatiale.....	72
Figure 19: Distribution schématique de l'agencement des villes : homogène à <i>gauche</i> et hétérogène à <i>droite</i> .....	73
Figure 20: Les cinq réseaux modélisés.....	77
Figure 21: Distribution hiérarchique selon le type de réseau.....	82
Figure 22: <i>Comparaisons</i> des résultats : réseau de Manhattan / réseau Invariant d'échelle.....	83
Figure 23: Taille finale des villes (réseau Invariant d'échelle).....	90
Figure 24 Configuration initiale du réseau « P-C ».....	92
Figure 25: Comparaison aux distributions théoriques (réseau « P-C »). En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi.....	92
Figure 26: Structure du réseau Invariant d'échelle. À gauche la configuration initiale, à droite la configuration modifiée.....	96
Figure 27: Structure du réseau de Manhattan. À gauche la configuration initiale, à droite la configuration modifiée.....	96
Figure 28: Évolution hiérarchique des plus petites villes (dernier décile) après augmentation des vitesses (en bleu les plus petites villes à l'état initial).....	101

Figure 29: Évolution hiérarchique des plus petites villes (dernier décile) après augmentation des vitesses (en bleu les plus petites villes à l'état initial) (suite).....	102
Figure 30: Structure du réseau du modèle « rocade » (en bleu les plus petites villes).....	103
Figure 31: Évolution hiérarchique des plus petites villes (population inférieure à 100), modèle « rocade ». En bleu, les plus petites villes à l'état initial.....	106
Figure 32: Représentation schématique de la fusion des deux réseaux de villes (réseau Aléatoire) A et B. En rouge les 4 arcs qui les connectent.....	107
Figure 33: Position hiérarchique des villes selon leur classe (en rouge les villes du 1er décile, en bleu les villes du dernier décile et en vert les villes intermédiaires) après fusion des réseaux A et B (version1).....	108
Figure 34: Représentation schématique de la fusion des deux réseaux de villes (réseau Invariant d'échelle) A et B. En rouge les 4 arcs qui les connectent.....	109
Figure 35: Position hiérarchique des villes selon leur classe (en rouge les villes du 1er décile, en bleu les villes du dernier décile et en vert les villes intermédiaires) après fusion des réseaux A et B (version2).....	110
Figure 36: Localisation des « lieux habités » en l'an 300 (source : Euratlas).....	112
Figure 37: Les trois réseaux théoriques construits.....	114
Figure 38: Comparaison des distributions hiérarchiques obtenues et de la distribution actuelle des villes modélisées avec les modèles théoriques (modèle géo-histoire).....	116
Figure 39: Résultats cartographiques de la répartition spatiale de la population (modèles géo-histoire).....	120
Figure 40: Simplification spatiale du modèle de Christaller (Christaller, 1933).....	121
Figure 41: Segmentation d'un Arc en Lieux.....	130
Figure 42: Décomposition du modèle "Émergence".....	130
Figure 43: Évolution du D-min et D-max d'un Marchand par son historique des interactions...	134
Figure 44: Schématisation d'un intervalle d'échange.....	134
Figure 45: Diagramme de classe (agent Marchand).....	135
Figure 46: Différence de structure selon la probabilité d'émergence de nouveaux arcs.....	137
Figure 47: Structure des réseaux types modélisés (modèle « Émergence »).....	139
Figure 48: Plan d'expérience par topologie de réseau (modèle « émergence »).....	140
Figure 49: Structure schématique du système de villes en fin de simulation pour un mode d'interaction ALL entre agents Marchands et pour chaque réseau modélisé (en bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes).....	143
Figure 50: Évolution des plus courts chemins (distance Lieux) en fonction de l'évolution de la structure du réseau.....	145
Figure 51: Distributions hiérarchiques selon le type de réseau (migration : 1%, seuil émergence : 7%, sans émergence de nouveaux arcs).....	148
Figure 52: Distributions hiérarchiques selon le type de réseau (migration : 1%, seuil émergence : 7%, sans émergence de nouveaux arcs) (suite).....	149
Figure 53: Distributions hiérarchiques pour les réseaux Invariant d'échelle et de Manhattan (migration : 1%, seuil émergence : 7%, émergence de nouveaux arcs).....	150
Figure 54: Distributions hiérarchiques des réseaux Small World et SW (migration : 1%, seuil émergence : 7%, émergence de nouveaux arcs).....	151

Figure 55: Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour le réseau SW (migration:1%, seuil émergence 7%, mode d'interaction ALL, Probabilité d'émergence nouvelle d'arcs : nulle).....	155
Figure 56: Localisation hiérarchique des villes émergentes (en rouge) pour le réseau Invariant d'échelle (migration:1%, seuil émergence 7%, mode d'interaction ORIGINE, Probabilité d'émergence nouvelle d'arcs : nulle).....	156
Figure 57: Schématisation de la différence entre émergence homogène ou concentrée des villes émergentes.....	160
Figure 58: Réduction de la longueur des arcs qui accompagnent l'émergence d'une nouvelle ville .....	168
Figure 59: Schématisation du regroupement en « grappe » autour du foyer attractif et émergence des villes « étapes » (en bleu les villes initiales, en rouge les nouvelles villes).....	169
Figure 60: Localisation des villes pour le réseau Invariant d'échelle. En bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes.....	170
Figure 61: Localisation des villes pour le réseau de Manhattan. En bleu les villes initiales, en rouge les villes émergentes.....	171
Figure 62: Comparaison entre le réseau théorique « Triangle » et le réseau routier national français (RNN) (source : <a href="https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/liaisons-du-reseau-routier-national">https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/liaisons-du-reseau-routier-national</a> ) .....	173
Figure 63: Comparaison des localisations des villes en l'an 300 et actuelles. (Source: Euratlas et INSEE).....	174
Figure 64 Résultats cartographiques de la localisation des villes émergentes (modèles géo-histoire Émergence pour le réseau « Triangle »).....	176
Figure 65 Pertinence des localisations des villes émergentes obtenues en fonction de la localisation des 266 plus grandes villes métropolitaines françaises de 2017.....	177
Figure 66: Comparaison entre des distributions hiérarchiques simulées (modèles géo-histoire Émergence) <i>et des</i> distributions hiérarchiques théoriques et réelles. En rouge : distribution simulée, en bleu : distribution selon Zipf, en vert : distribution selon Belhedi (Source : INSEE) .....	180
Figure 67: Distributions hiérarchiques (log-log) selon les paramètres de simulations et, distribution hiérarchique actuelle des plus grandes villes métropolitaines françaises (modèles géo-histoire Émergence).....	181
Figure 68: Résultats cartographiques de la répartition spatiale de la population (modèles géo-histoire Émergence pour le réseau « Triangle »).....	183



## Index des tableaux

### Index des tables

Tableau 1: Tableau de comparaison des SMA étudiant l'évolution du système de peuplement...	40
Tableau 2: Plan d'expérience pour chacun des deux sous-modèles.....	56
Tableau 3: Étude de l'écart aux modèles théoriques (modèle aléatoire). Les écarts maximums en rouge et minimum en bleu.....	60
Tableau 4: Étude de l'écart aux modèles théoriques (modèle contribution). Les écarts maximums en rouge et minimum en bleu.....	62
Tableau 5: Corrélation (modèle aléatoire).....	66
Tableau 6: Corrélation (modèle contribution).....	68
Tableau 7: Caractéristique des réseaux Aléatoire, Manhattan et Manhattan tronqué.....	79
Tableau 8: Caractéristique des réseaux Small world et Invariant d'échelle.....	80
Tableau 9: Plan d'expérience par topologie de réseau (modèle d'interaction spatiale).....	81
Tableau 10: Hiérarchies des villes pour différents réseaux (modèle spatial).....	84
Tableau 11: Synthèse des principales corrélations significatives (distance topologique). (Les cases <i>vides</i> correspondent à des valeurs non significatives).....	88
Tableau 12: Synthèse des principales corrélations significatives (distance-temps). (Les cases <i>vides</i> correspondent à des valeurs non significatives).....	89
Tableau 13 Étude de l'écart aux modèles théoriques (réseau « P-C »).....	93
Tableau 14: Modification du réseau par topologie type.....	95
Tableau 15: Le taux de variation moyen des rangs par simulation (avec et sans modification de la structure du réseau).....	97
Tableau 16: Évolution des propriétés de chaque réseau une fois les vitesses modifiées.....	99
Tableau 17: Le taux de variation moyen du rang des villes (après augmentation des vitesses)....	99
Tableau 18: Évolution du rang des villes modèle « rocade » (Simulation sur 150 ticks, taux de migration 2%).....	104
Tableau 19: Évolution du rang des villes modèle « rocade » (Simulation sur 300 ticks, taux de migration 2%).....	105
Tableau 20: Propriétés des réseaux (version 1).....	108
Tableau 21: Propriété des réseaux (version 2).....	109
Tableau 22: Propriétés des réseaux théoriques construits.....	114
Tableau 23: Comparaison aux modèles théoriques (modèle géo-histoire). En rouge, les valeurs maximales et en bleu, les valeurs minimales pour chaque réseau.....	117
Tableau 24: Comparaison aux modèles théoriques (modèle géo-histoire) (Population initiale de 300 et taux de migration de 0.2%).....	119
Tableau 25: Distances moyennes entre villes du même <i>quartile</i> pour les réseaux théoriques construit (en mètres).....	121
Tableau 26: Total de villes par quartile présentes dans l'ensemble du voisinage des villes du Quartile 4.....	122
Tableau 27: Les paramètres du modèle « Émergence ».....	138

Tableau 28: Propriétés des différents réseaux modélisés.....	140
Tableau 29: Nombre villes émergentes par simulation.....	142
Tableau 30: Influence de la topologie sur l'intensité de l'émergence des villes.....	144
Tableau 31: Comparaison des distributions hiérarchiques simulées (pour tous les réseaux) selon la possibilité ou pas de faire émerger de nouvelles villes et selon le mode d'interaction.....	152
Tableau 32: Comparaison au modèle théorique (modèle « Émergence », sans création de nouveaux arcs). Valeurs maximales en rouge.....	153
Tableau 33: Comparaison au modèle théorique (modèle « Émergence », avec création de nouveaux arcs 50%). Valeurs maximales en rouge.....	154
Tableau 34: Le nombre de villes dans le « top 5 » (pour un maximum de 40) pour 8 simulations selon la probabilité d'émergence de nouveaux arcs et le réseau modélisé.....	157
Tableau 35: Identifiant des villes émergentes du « top 5 ».....	158
Tableau 36: Les distances (en Lieux) moyennes entre villes émergentes et avec les villes initiales les plus proches.....	161
Tableau 37: Moyenne initiale de chaque indicateur par réseau.....	162
Tableau 38 : Moyenne des indicateurs par catégorie de villes (en rouge : les plus fortes moyennes).....	163
Tableau 39: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Invariant d'échelle). % = <i>proportion variance expliquée</i> .....	165
Tableau 40: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Manhattan). .....	166
Tableau 41: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau Small world). .....	166
Tableau 42: Caractérisation de chaque classe par moyenne conditionnelle (réseau SW).....	167
Tableau 43: Les distances (en Lieux) moyennes entre villes émergentes et avec les villes initiales les plus proches (modèle géo-histoire Émergence).....	178
Tableau 44: Comparaison entre les modèles théoriques (modèle géo-histoire Émergence) et la distribution des plus grandes villes métropolitaines françaises actuelles. Source : INSEE.....	182