



HAL
open science

Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents

Anne Bretagnolle, Benoît Glisse, Thomas Louail, Denise Pumain, Céline Vacchiani-Marcuzzo

► **To cite this version:**

Anne Bretagnolle, Benoît Glisse, Thomas Louail, Denise Pumain, Céline Vacchiani-Marcuzzo. Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents. Colloque de Cerisy Systèmes complexes en sciences humaines et sociales, 26 mai-2 juin 2007, Jun 2007, France. halshs-00159894v1

HAL Id: halshs-00159894

<https://shs.hal.science/halshs-00159894v1>

Submitted on 4 Jul 2007 (v1), last revised 28 Oct 2010 (v3)

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.

Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents

Anne Bretagnolle¹, Benoît Glisse², Thomas Louail³,
Denise Pumain¹, Céline Vacchiani-Marcuzzo⁴

Texte présenté au Colloque de Cerisy « Systèmes complexes en sciences humaines et sociales »⁵, 26 mai-2 juin 2007

Introduction

Les réseaux de villes sont des objets géographiques à part entière, dont les propriétés ont été bien établies par des géographes ou économistes spatiaux dès le 19^{ème} siècle (pour une revue détaillée, voir Pumain 1997 et 2006, Bretagnolle 2005 et Bretagnolle, Robic 2005). Les récentes avancées dans le domaine de la théorie des systèmes complexes ont néanmoins permis d'apporter des éclairages nouveaux, tant à travers les discussions autour de concepts clés tels que l'émergence, les relations d'échelles ou la notion d'imprévisibilité, qu'à travers la mise en œuvre de modèles multi-agents, particulièrement bien adaptés aux systèmes complexe. Grâce à ces modèles, la démarche hypothético-déductive trouve tout son sens, par un aller-retour incessant entre la théorie injectée dans les règles et les paramètres du modèle, les simulations qui en sont issues et les observations historiques. Ces modèles sont encore peu appliqués aux systèmes de villes, souvent considérés comme difficiles à appréhender car présupposant une approche multi-scalaire et une conception des villes en tant qu'entités collectives, co-évoluant au travers d'un réseau d'interdépendances matérialisées le plus souvent (mais pas toujours) par des systèmes de transport et d'informations. Pourtant, nous montrons ici la richesse d'une telle approche : une fois les villes caractérisées par leur taille (nombre d'habitants) et leurs fonctions (activités urbaines), les systèmes de villes laissent apparaître des propriétés fortes (la plus connue étant la « loi de Zipf », qui traduit la régularité de la distribution des tailles de villes, mais nous en évoquerons d'autres plus loin). Partant de ces propriétés, la modélisation permet alors de tester les hypothèses explicatives qui peuvent être avancées par les chercheurs, et, une fois construit un modèle théorique de l'évolution des systèmes de villes, de tester les modifications qui doivent être apportées à ce modèle générique pour pouvoir simuler les spécifications propres à tel ou tel système de villes dans le monde.

Pour mener à bien cette exploration, nous nous appuyons sur le long travail déjà réalisé au laboratoire Géographie-cités, qui a conçu dès les années 90, en collaboration avec l'équipe de Jacques Ferber, un modèle multi-agents appelé Simpop (Bura et al. 1996, Sanders et al., 1997). Dans le cadre d'une collaboration plus récente avec les informaticiens du LIP6 (Alexis Drogoul et Benoît Glisse), le modèle Simpop2 a été conçu comme un modèle générique, simulant l'évolution d'un ensemble de villes en interaction sous des hypothèses de concurrence, formalisées par le fonctionnement spatialisé d'un marché d'échanges. Ces villes sont rendues hétérogènes par la diversité de leurs fonctions socio-économiques et par leur plus

¹ Université Paris 1, Laboratoire Géographie-Cités (UMR 8504).

² LIP6 (Laboratoire d'Informatique de Paris 6).

³ IBISC, Université d'Evry

⁴ Université de Reims-EA Habiter, Laboratoire Géographie-Cités (UMR 8504)

⁵ Le travail présenté ici est le résultat de l'ACI Système Complexe en SHS (2003-2006), qui a permis de financer notre projet intitulé « Emergence et évolution des systèmes urbains : un modèle de simulation en fonction des conditions historiques de l'interaction spatiale » (porteur : Anne Bretagnolle).

ou moins bonne insertion dans les réseaux de l'échange. Différents modèles spécifiques ont été construits à partir du modèle générique, par exemple le modèle Eurosim, simulant les villes européennes de plus de 200 000 habitants de 1950 à 2050 à partir de différents scénarios prospectifs (Sanders et al., 2005). D'autres applications ont été réalisées pour simuler l'émergence et l'évolution des villes sur des durées beaucoup plus longues. Nous présentons ici les résultats d'une comparaison entre les modalités d'évolution des systèmes de villes dans les pays anciennement urbanisés (Europe 1300-2000) et ceux des pays Neufs (Etats-Unis, Afrique du Sud, 1650-2000). Les simulations permettent de mettre en évidence de fortes similitudes, qui confirment la solidité de la théorie urbaine évolutive testée par le modèle, mais révèlent aussi des différences fondamentales dans les formes d'occupation de l'espace.

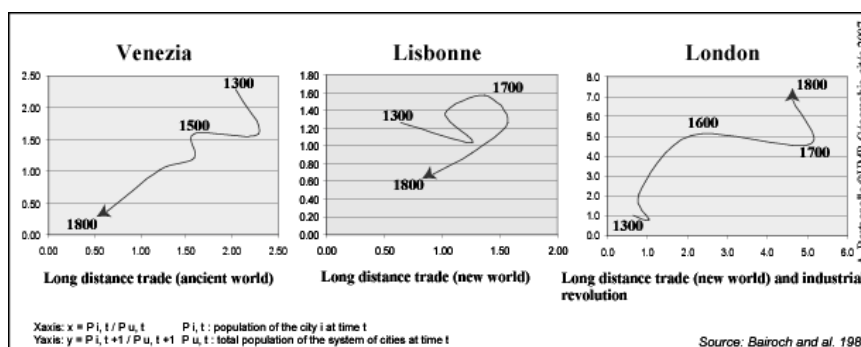
1. Les réseaux de villes dans le champ des systèmes complexes

1.1 Des interactions spatiales multi-échelles et évolutives

Une ville peut être définie en première instance comme un simple regroupement d'individus et d'entités collectives (associations, entreprises, corporations) gérés par des institutions, mais la lecture et l'interprétation de sa trajectoire historique sont biaisées si l'on ne prend pas en compte sa position dans les réseaux d'échanges et les types d'interactions qu'elle développe à plusieurs échelles géographiques, allant du local (l'hinterland ou la région complémentaire de Walter Christaller) au régional (les villes de la Hanse, au Moyen Âge, les villes du Mississippi, à l'époque de la navigation à vapeur) ou au mondial (Venise, à la tête du « système-monde » européen du 12^{ème} au 14^{ème} siècle, avant d'être détrônée par les villes de l'Atlantique, de la Belgique, des Pays-bas et de l'Angleterre, en particulier Londres, propulsée au premier plan par la révolution industrielle dès 1800). A la complexité de ces interdépendances multi-niveaux s'ajoutent des transformations historiques de la dimension des interactions, liée à l'évolution des techniques de transport, d'information ou de stockage, qui permet non seulement un accroissement des portées des interactions mais parfois des changements notables dans la configuration des circuits de l'échange (promotion des villes de l'Atlantique au détriment des villes méditerranéennes, essor des villes fluviales et du commerce continental en lien avec la navigation à vapeur etc...) (Voir figure 1, représentant l'évolution du poids d'une ville dans le système : en ordonnée, le poids de la ville dans le système, une année donnée ; en abscisse, le poids qu'elle occupait l'année précédente).

Figure 1 : Les villes de l'économie-monde, à des époques différentes de portées spatiales des interactions

- Trajectoire de Venise, Lisbonne et Londres dans le plan des phases (1300-1800).



Les systèmes de villes résultant de ces interactions multi-échelles sont difficiles à définir car ils ne sont généralement pas réductibles à une réalité territoriale simple, à l'exception des

réseaux formés à l'intérieur des frontières nationales, indurés par l'utilisation pluri-séculaire de réseaux de transports utilisant des infrastructures en dur (relais de poste, routes, rails) et par la stabilité de la répartition territoriale des lieux de contrôle politique et administratif. En revanche, si l'on se place à l'échelon international, on ne peut représenter spatialement les systèmes qui en sont issus (comment délimiter par exemple le contour du système des villes européennes ?), ni même énumérer les villes qui les composent (reprenant l'exemple de l'Europe, quelles villes font partie de ce système : les plus grandes ? Celles qui sont spécialisées dans des activités internationales ? Celles qui sont connectées aux réseaux de transports les plus performants ?). Cette difficulté à circonscrire tant le contenant que le contenu a longtemps pesé sur les recherches abordant la ville à ce niveau d'observation, qui se sont souvent cantonnées à des échelles définies a priori, par exemple par les frontières nationales.

L'approche par la théorie des systèmes complexes permet de s'affranchir de ces difficultés, ou du moins de ne pas les considérer comme un handicap mais au contraire comme une manifestation, dans le domaine des sciences sociales, de propriétés de systèmes complexes mises en évidence par exemple dans le domaine de la biologie : les systèmes de villes sont multi-scalaires, dynamiques, ouverts, et caractérisés par des propriétés émergentes. Dans le modèle multi-agents issu de ces réflexions, nous prenons en compte simultanément des réseaux d'échanges à plusieurs échelles (locale, régionale, nationale et internationale), sur des durées de temps très longues (caractérisées notamment par des changements profonds dans les types de transport et par la portée des réseaux, paramétrés dans le modèle) et ne nécessitant pas d'établir des frontières externes définies a priori (par exemple, pour les Etats-Unis, l'environnement international joue un rôle actif dans le modèle, dès le 18^{ème} siècle).

1.2 Des propriétés émergentes au niveau macroscopique

Le système des villes se caractérise, comme d'autres systèmes complexes, par une forte dichotomie apparente entre le comportement des entités élémentaires (ici les villes), à l'échelle mesoscopique, et celui du système, à l'échelle macroscopique. Ramenées aux deux indicateurs principaux qui nous intéressent ici, la population totale des villes et les fonctions des villes, les observations sur l'évolution des villes d'un recensement à un autre mettent en évidence une multitude de fluctuations, caractérisées par des croissances suivies de déclin et dont la juxtaposition s'apparente à des oscillations sans ordre apparent (ces propriétés ont par exemple été mises en évidence par Denise Pumain en 1982 et par France Guérin-Pace en 1993, pour les villes françaises). Ces nombreuses fluctuations locales ne s'expriment pourtant pas par des modifications de la structure du système, lequel reste beaucoup plus stable : la différenciation hiérarchique des tailles de villes (« loi de Zipf », figure 2), l'arrangement spatial des villes compte tenu de leur taille (figure3) et la différenciation fonctionnelle des villes (en termes de spécialisations économiques) sont en effet susceptibles de se maintenir selon des durées beaucoup plus grandes que celles des individus qui les composent, et qui sont caractérisés par des changements de professions, des migrations ou par le renouvellement des générations (Pumain 1977, Paulus 2004).

Figure 2 : Une structure hiérarchique régulière et stable

- Distributions rang-taille des villes en Europe et aux Etats-Unis

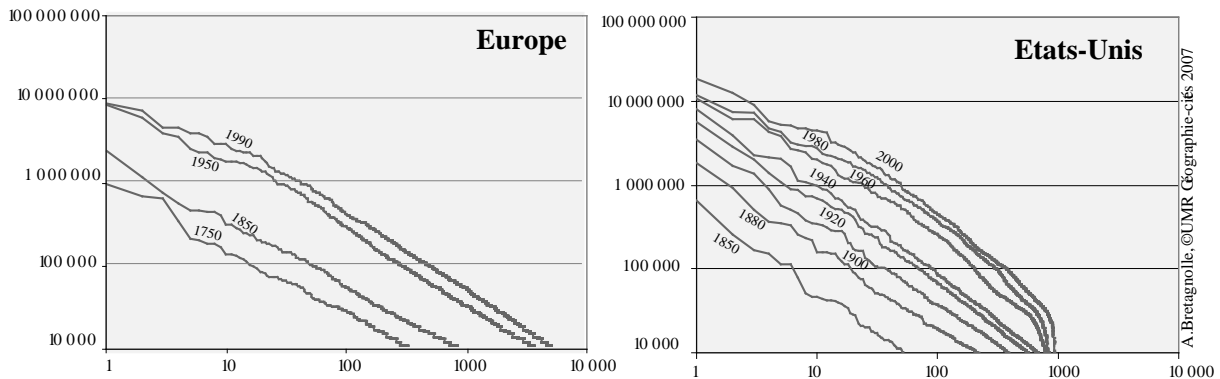
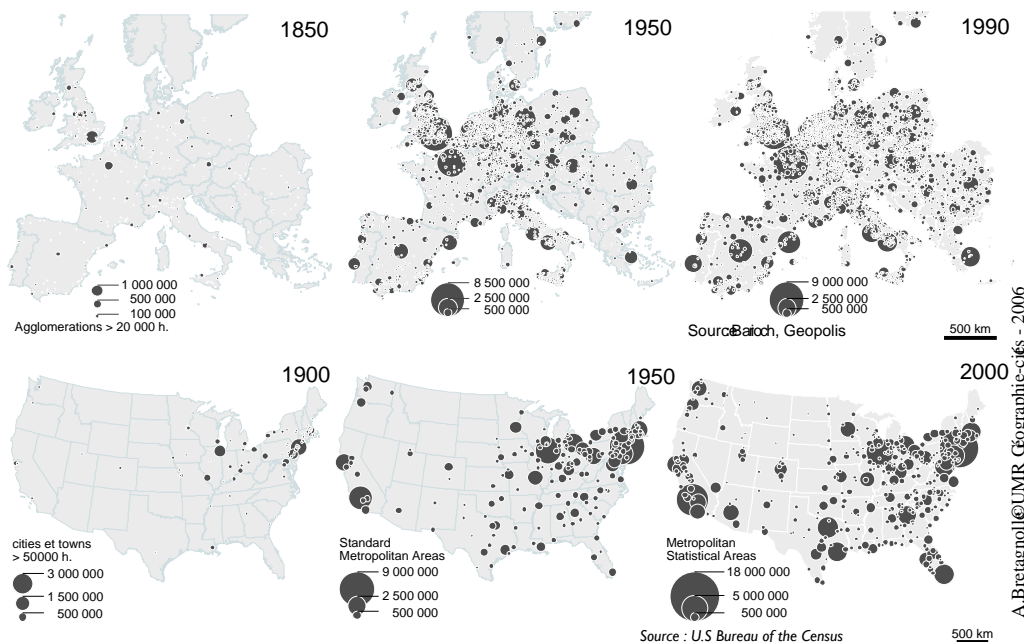


Figure 3 : Une trame géographique persistante

- Trame des villes en Europe et aux Etats-Unis



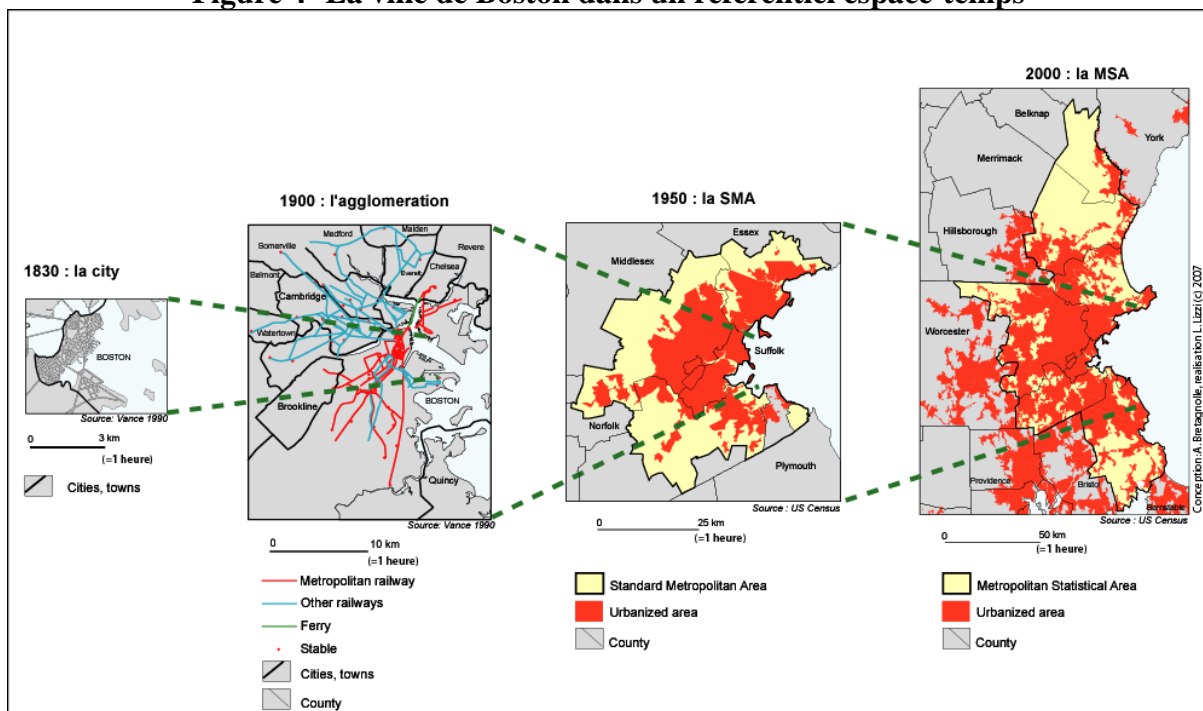
Cette structure, si elle reste globalement stable, se transforme très lentement, notamment par un processus de diffusion hiérarchique des innovations (exemple actuel des services aux entreprises, encore très concentrés dans les plus grandes métropoles) et par des vagues de spécialisations fonctionnelles (villes de l'industrie, villes du tourisme...). Ces processus sont essentiellement non linéaires : la croissance produit une concentration dans les grandes villes, en partie liée à des boucles de rétro-action positives entre leur accessibilité (adoption précoce des moyens de transport modernes : routes royales, chemin de fer, TGV...) et la captation du profit des innovations (rôle de l'avantage initial, lié à leur site ou à leur situation). Au cours du temps, les étapes intermédiaires sont court-circuitées du fait de la réduction du nombre des points d'arrêt nécessaires dans les réseaux de transport rapides, ce qui produit un affaiblissement systématique des plus petites villes. En outre, les dynamiques des villes, en termes de croissance économique et démographique, sont susceptibles de retournements : à la différence du cycle du produit en économie, il n'y a pas, dans un système évolué, de totale substituabilité pour les villes, mais plutôt réemploi de localisations anciennes qui ont pu

cesser momentanément d’être valorisées et qui retrouvent par la suite une attractivité lors d’un nouveau cycle de développement économique.

1.3 Au niveau mesoscopique, définir la ville dans un référentiel spatio-temporel

L’interprétation convenable des dynamiques observées à l’échelle macroscopique ne peut se faire sans une délimitation rigoureuse et correcte des entités à l’échelle mesoscopique, s’appuyant sur une véritable ontologie de la ville. Entité collective dotée d’une puissance de développement à part entière, la ville se caractérise (surtout depuis la révolution de l’industrie et des transports) par une force de croissance dont on mesure les retombées à la fois sur le plan démographique (population et nombre des villes) et en termes de consommation d’espace (rayon des agglomérations, caractérisées par un bâti continu et dense, portée des navettes domicile-travail effectuées par les actifs). Entre 1800 et 2000, la population urbaine maximale observée à l’échelle du monde a été multipliée par 30 et la surface des grandes villes par 100. L’utilisation de bases de données sur les villes mises à la disposition des chercheurs par les organismes de recensement peut conduire à des analyses erronées, en ne tenant pas compte de ces évolutions démographiques et spatiales majeures et en minorant systématiquement la portée spatiale du phénomène urbain. Ainsi, la ville définie officiellement aux Etats-Unis jusqu’en 1950 est une simple municipalité politique (appelée city ou town, selon les états), réalité territoriale qui ignore totalement le développement massif des banlieues à la fin du 19^{ème} siècle et sous-estime donc largement la croissance des plus grandes villes. Lorsqu’on tient compte d’un référentiel spatio-temporel, par exemple en considérant la ville comme un territoire de fréquentation quotidienne délimité par un rayon d’une heure de temps (correspondant au budget-temps moyen consacré par les ménages au transport au moins depuis les années 1950, date des premières enquêtes sur les navettes), on restitue alors de manière cohérente dans le temps et dans l’espace la réalité du phénomène urbain (figure 4).

Figure 4- La ville de Boston dans un référentiel espace-temps



Pour mener à bien l’exploration comparée des systèmes de villes en Europe et aux Etats-Unis, nous avons donc accordé un soin particulier à la construction de bases de données

harmonisées sur les populations urbaines. Pour les Etats-Unis, aucune base n’existait pour une telle période de temps (c’est à dire entre 1790, date du premier recensement, et 2000) aussi avons-nous entrepris de la construire nous-même, durant l’année 2006 (pour une présentation détaillée de cette base, voir Bretagnolle, Giraud, Mathian 2007). Nous avons utilisé la totalité des recensements de population (un tous les 10 ans) et reconstruit, à chaque date, une délimitation spatiale appropriée des villes (Tableau 1). De 1790 à 1870, les villes sont définies comme étant des municipalités, puis, entre 1870 et 1940, nous les définissons comme des agglomérations, en regroupant au moyen d’un critère de distance-temps les municipalités localisées à portée d’une plus grande. A partir de 1940, nous utilisons à nouveau la définition officielle du recensement, qui délimite sur la base des navettes domicile-travail les aires fonctionnelles polarisant un certain pourcentage d’actifs (*Metropolitan Areas* ou *Micropolitan Areas*), et nous les harmonisons dans le temps. Pour l’Europe, nous avons utilisé les bases de données définissant des agglomérations de plus de 10 000 habitants, construites par Paul Bairoch (1988) et François Moriconi-Ebrard (1993), en les harmonisant et en les complétant (Tableau 1).

Tableau 1: Evolution du nombre de villes en Europe et aux Etats-Unis

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

Sources et bases de données: Europe: Bairoch et al. (1988), Pinol (2003), *Géographie-cités* (2005); Etats-Unis: *Census of the U.S.*, Bretagnolle, Giraud (2006).

2. Du modèle théorique au modèle générique Simpop2

Le modèle théorique que nous avons élaboré intègre différents aspects des théories urbaines développées dans le champ de la géographie et de l’économie spatiale, qui accordent un rôle essentiel aux interactions et à l’évolution de la position relative des villes dans les réseaux d’échange pour l’explication des dynamiques démographiques et fonctionnelles observées (Pumain 1997, Sanders et al. 2006). Ce modèle met en avant le rôle de l’espace dans la dynamique du système et ne prétend pas reproduire, comme le ferait un modèle économique, les mécanismes réels d’un marché d’échanges ou d’un cycle de produit : par exemple, les paramètres que nous avons utilisés concernant la productivité ou la demande par habitant pour telle ou telle fonction urbaine ont été estimés de manière rudimentaire (à partir des travaux d’historiens ou d’économistes, tels Mitchell, 1992 ou Bairoch, 1988), et n’ont pour nous de valeur que dans la comparaison, dans le temps et dans l’espace. Nous résumons ici à grands traits les propositions principales et la manière dont nous les avons traduites dans le modèle multi-agents (pour plus de détail, on pourra se reporter au site Internet dédié, <http://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr>).

2.1 Les règles gouvernant la dynamique des villes

La dynamique des villes résulte de trois types de processus : d’une part, l’apparition de cycles d’innovations qui ont eu un rôle majeur dans la croissance urbaine, ensuite les règles d’acquisition de nouvelles fonctions par les villes, s’exprimant par un processus général de diffusion hiérarchique de ces innovations, enfin la prise en compte des innovations dans les techniques de déplacement et de communication, entraînant une modification de l’espace des échanges inter-urbains.

Parmi les nombreux cycles d'innovation (économique ou sociale) repérables dans l'histoire, seuls ceux qui ont sélectionné spécifiquement un groupe particulier de villes en les spécialisant par rapport au reste du système urbain ont été retenus. Quatre cycles d'innovation répondent à ces critères :

- Le *grand commerce maritime et fluvial*, dès 1200-1300, en Europe, avec l'invention de techniques de change et de crédit permettant des échanges de très longue portée, les progrès dans la navigation et les grandes découvertes historiques renouvelant en partie les villes spécialisées dans ce type de fonction et leurs réseaux d'échanges jusqu'au 17^{ème} siècle.

- La *première révolution industrielle*, dès le début du 19^{ème} siècle, en Europe, les villes concernées étant soit des localités monospécialisées des bassins miniers et sidérurgiques, soit des grandes villes capables de diversifier l'éventail de leurs fonctions.

- La *seconde révolution industrielle de l'électricité et de l'automobile*, dès les années 1900 en Europe, un peu plus tôt aux Etats-Unis, avec des villes spécialisées dans la production pétrolière, la construction automobile ou les pneumatiques, les centrales hydro-électriques.

- La *révolution des techniques de l'information*, dès les années 1950 en Europe, un peu plus tôt aux Etats-Unis, avec la promotion de villes spécialisées dans la production de l'information ou utilisant les nouvelles technologies pour promouvoir des services aux entreprises de haut niveau ou encore le tourisme.

Ces nouvelles spécialisations se répandent de manière très spécifique à l'intérieur du système de villes. L'une des hypothèses clé du modèle est fondée sur une observation de la théorie de la diffusion spatiale des innovations, formulée par T. Hägerstrand et vérifiée maintes fois à propos des systèmes de villes, notamment par A. Pred. Selon cette théorie et ces observations, une innovation se propage dans un système de villes en allant des plus grandes aux plus petites, en suivant la hiérarchie urbaine (et non pas une règle de proximité géographique comme c'est le cas pour la propagation des épidémies ou la diffusion des innovations agricoles par exemple). Les plus grandes villes disposent en effet des infrastructures, de la diversité sociale et du niveau fonctionnel requis pour adopter la nouveauté, elles sont en avance dans le processus d'adaptation au changement du système des villes. La taille d'une ville, en population ou en richesse, est donc souvent un pré-requis dans les règles qui permettent aux villes d'acquérir une nouvelle fonction dans le modèle. Cette règle peut être modulée par d'autres conditions, par exemple de localisation (on ne permet pas à deux capitales d'Etat de se localiser trop près l'une de l'autre) ou de niveau fonctionnel antérieur (une ville ne peut acquérir une fonction centrale d'un niveau donné si elle ne possède pas déjà celles de niveau inférieur). La précocité d'adoption joue aussi un rôle, dans la mesure où le marché associé à une fonction donnée (qui varie en amplitude au cours du temps) ne permet pas de dépasser un nombre donné de villes possédant cette fonction. Cependant, une ville qui aurait acquis une fonction et qui ne trouverait pas sa place dans le marché la perdrait au bout de quelques itérations, de même qu'un marché déclinant (pour un cycle d'innovation en phase de banalisation puis d'obsolescence) peut aussi conduire à la disparition de certaines fonctions dans les villes spécialisées.

Enfin, le modèle tient compte systématiquement des innovations majeures dans les techniques de transport et d'information, qui ont permis un accroissement notable de la portée des interactions et un renouvellement des circuits de l'échange. Pour chaque type et niveau de fonction, le modélisateur dispose d'un paramètre réglant la portée maximale des échanges, qu'il peut faire varier au cours du temps en fonction des données fournies par la documentation historique. En outre, certains niveaux de fonctions centrales apparaissent de manière spécifique en lien avec une nouvelle technique de transport (le train au 19^{ème} siècle, l'automobile ou l'avion au 20^{ème} siècle).

2.2 Les fonctions urbaines et les types d'interactions

Trois types de fonctions sont retenus dans le modèle :

- Les *fonctions centrales* sont celles qui dépendent de l'exercice de la centralité d'une ville, c'est-à-dire celles assurant la desserte, en biens et en services, d'une population locale et environnante. Elles demeurent principalement dans une contrainte de proximité, aussi les réseaux de villes clientes ont toute chance de se développer selon des configurations de type gravitaire. Deux niveaux sont retenus initialement : le niveau local (Central 1, donnée à toutes les villes, commercialise les surplus agricoles des villages environnants, dans une portée de quelques km, correspondant à des échanges quotidiens), et le niveau régional (Central 2, produisant des biens commerciaux destinés à la demande des villes, dans une portée d'une cinquantaine de km, correspondant à une journée de voyage à l'époque pré-industrielle). Afin de tenir compte de l'évolution de la portée des échanges dans le temps et de la demande (notamment en biens de consommation plus diversifiés), deux nouveaux niveaux de fonctions centrales sont introduits (Central 3 à partir de la révolution des transports, et Central 4 à partir de 1900, avec des portées qui s'accroissent dans le temps).

- Les *fonctions territoriales* sont celles qui agissent dans le cadre de limites administratives : les interactions sont alors dissymétriques et s'effectuent de façon déterministe avec toutes les villes de la circonscription. Deux niveaux sont retenus : le niveau régional du chef-lieu et le niveau national. Cette dernière fonction est introduite seulement lorsque les frontières des royaumes ou Etats sont relativement stables, soit vers 1500 pour l'Europe, 1800 pour les Etats-Unis. Une fois la fonction acquise, les chefs-lieux et capitales prélèvent une part de la richesse des villes situées dans les limites de leur territoire, selon un système de taxe.

- Les *fonctions spécialisées* sont celles impulsées par les différents cycles d'innovation. Elles se caractérisent par des interactions qui peuvent être très lointaines. Les villes qui possèdent la fonction spécialisée du moment ont les croissances les plus fortes, cependant, plus la spécialisation vieillit, plus la croissance associée pour la ville se ralentit. Celle-ci peut retrouver une nouvelle spécialisation, soit à la suite d'un tirage aléatoire (notamment si elle fait partie d'un gisement, industriel, pétrolier ou autre), soit en raison de sa richesse ou de sa spécialisation précédente.

2.3 Le fonctionnement du marché d'échange

Parmi les 10 fonctions urbaines prises en compte dans le modèle (4 fonctions centrales, 2 fonctions territoriales et 4 fonctions spécialisées), seules les fonctions centrales de niveau supérieur (2, 3 et 4) et les fonctions spécialisées sont associées à un marché d'échange. En effet, pour les deux fonctions territoriales, une taxe est simplement prélevée par la ville sur les richesses acquises à chaque pas de temps (soit tous les 10 ans) par les villes relevant de sa juridiction.

Chaque fonction intervenant dans le marché d'échange est paramétrée par une productivité et une demande par habitant, qui évoluent dans le temps. Il s'agit de variables exogènes, dont les modalités s'apparentent plus à des ordres de grandeurs qu'à des valeurs précises (qu'il serait impossible de calculer avant le 19^{ème} siècle) et qui respectent deux contraintes : la hiérarchie entre les fonctions (la demande ou la productivité par habitant est plus faible pour la fonction central 2 que pour central 3, et ainsi de suite) et l'évolution temporelle (avec le temps, la demande tout comme la productivité s'accroissent). En outre, une troisième variable exogène concerne la part d'actifs par fonction au moment où la fonction apparaît dans une ville (ensuite, cette part d'actifs est réévaluée à chaque itération, en fonction des résultats de l'échange). (les valeurs de ces trois types de paramètres sont décrites sur le site dédié à Simpop2).

Au début d'une itération (chacune simule une période de 10 ans), le modèle calcule pour chaque ville et pour chaque fonction son offre (productivité par habitant multipliée par le nombre d'actifs dans cette fonction) et sa demande (demande par habitant multipliée par la population totale de la ville). On constitue ensuite le réseau d'échange potentiel, c'est à dire la liste des villes localisées dans la portée du moment associée à la fonction et qui ont une demande (pour les fonctions spécialisées, seules les villes possédant certaines fonctions peuvent être clientes : par exemple les villes qui n'ont pas la fonction commerciale régionale, appelée central 2 dans le modèle, ne peuvent acheter des biens issus du grand commerce international (cycle 1). Nous souhaitons par là tenir compte du caractère assez sélectif des ces échanges de biens spécialisés). Une fois que chaque ville productrice d'une certaine fonction a constitué son réseau (échange d'informations sur la localisation des vendeurs, les stocks disponibles et les demandes adressées), un deuxième mécanisme intervient pour sélectionner les partenariats, c'est-à-dire les vendeurs et acheteurs qui vont réaliser un échange. Le producteur répartit son offre proportionnellement aux distances qui le séparent des acheteurs potentiels, selon une logique gravitaire (plus l'acheteur est proche et plus il est favorisé). Inversement l'acheteur potentiel répartit sa demande entre les différents producteurs proportionnellement à la taille de leur réseau de client potentiel respectif (plus un producteur a de clients potentiels, c'est-à-dire meilleure est sa position relative dans le réseaux de villes, plus il sera favorisé). Pour chaque couple vendeur/acheteur potentiel, on calcule ensuite le minimum entre l'offre proposée et la demande adressée, et c'est sur cette base que les échanges effectifs sont réalisés. Le procédé est réitéré jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'offre pouvant être satisfaite par une demande et vice-versa. A la fin de l'itération, la croissance de chaque ville (nombre d'actifs dans chaque fonction, population totale, richesse totale) est recalculée.

2.4 L'évaluation de la croissance démographique et économique d'une ville à chaque itération

Trois mécanismes interviennent dans le calcul de la croissance démographique. Le premier est indépendant du marché d'échanges et consiste dans l'attribution d'une part de la croissance démographique observée historiquement, indépendamment de la réussite ou non de la ville dans le marché d'échange, de sa taille ou de toute autre considération : chaque ville reçoit exactement le même taux, à une période donnée. Il s'agit de rendre compte ici de la tendance démographique conjoncturelle, plus ou moins bonne selon les périodes de crises (grande peste, guerres, récessions économiques) ou au contraire les périodes de forte urbanisation (transition démographique, exode rural etc.). La part du taux moyen de croissance démographique observé que nous injectons dans le modèle est un paramètre, qui peut évoluer dans le temps (par exemple pour les Etats-Unis) et qui nous renseigne sur les étapes de formation du système de villes : plus cette part est faible, plus la croissance générée en propre par le marché d'échanges est forte, ce qui permet une plus grande différenciation des tailles de villes par les mécanismes de concurrence.

Un deuxième mécanisme consiste dans l'ajustement, à la hausse ou à la baisse du nombre d'actifs par secteur d'activité pour chaque ville en fonction du résultat de ses échanges, et reflète ainsi la plus ou moins bonne attractivité de l'emploi dans chacun de ces secteurs. Lorsque la ville a écoulé toute son offre dans un certain secteur d'activité et qu'il reste des demandes insatisfaites de la part des clientes potentielles, le nombre d'actifs dans la fonction est augmenté de manière à mieux satisfaire la demande à l'itération suivante. Au contraire, si une ville n'a pu écouler toute sa production, le nombre de ses actifs est diminué, là aussi en tenant compte de la quantité d'offre invendue. Deux paramètres sont utilisés pour implémenter ce mécanisme, le potentiel de marché (qui évalue pour chaque ville et chaque fonction la demande insatisfaite ou au contraire la production invendue et le nombre total

d'actifs qu'il faudrait ajouter ou retirer pour s'adapter parfaitement à la demande) et la vitesse de réaction du marché (qui fixe, moyennant un aléa, la part des actifs réellement ajoutés ou retirés par rapport à ce total. Plus cette part est grande, plus vite la ville s'ajuste au résultat de l'échange et converge ainsi vers un équilibre. Cette vitesse de réaction est liée à la plus ou moins grande rapidité de l'information qui circule entre les villes et qui permet aux actifs de migrer rapidement vers telle ou telle localité attractive ; nous la faisons varier en fonction des progrès qu'ont connu les technologies de l'information dans ces derniers siècles).

Enfin, le troisième mécanisme consiste en une part de croissance démographique générée par les profits de l'échange. Par rapport au deuxième mécanisme, qui favorise indifféremment les villes possédant des fonctions centrales ou des fonctions spécialisées, celui-ci met fortement l'accent sur la théorie de l'échange inégal. Une ville qui fait le choix (et prend le risque) d'investir dans des secteurs de pointe est susceptible de gagner en retour des profits sans commune mesure avec ceux d'une simple place commerciale régionale, profits qui vont se traduire ensuite, à plus ou moins long terme, par une plus grande attractivité sur le marché du travail. Ce mécanisme est implémenté au moyen de deux paramètres, la plus-value sur chaque fonction et le retour du marché sur la croissance démographique. A la fin de chaque itération, le nombre d'unités de production vendues par la ville est converti en nombre d'unités de richesse, en tenant compte, au moyen du paramètre de plus-value qui varie selon les fonctions, des profits plus importants que l'on peut tirer de la vente de biens spécialisés et innovants. La richesse totale de la ville est recalculée, et l'on en déduit alors l'enrichissement relatif par rapport à l'itération précédente. Cet enrichissement est transformé en coefficient multiplicatif, appliqué au taux moyen de la croissance historique conjoncturelle.

Au total, la croissance démographique de chaque ville à la fin d'une itération résulte de la combinaison des trois mécanismes décrits ci-dessus. L'ensemble des équations et des paramètres qui interviennent dans le modèle sont présentés dans le site dédié à Simpop2.

3 Modélisation du système des villes d'Europe (1300-2000)

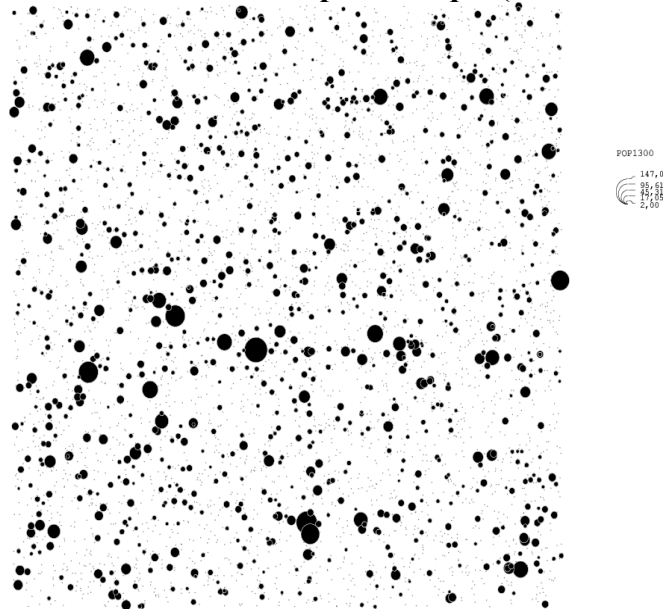
L'Europe se caractérise dès le tournant du 12^{ème} et du 13^{ème} siècle par la réactivation des circuits de l'échange inter-urbain à longue distance (commerce entre les villes de la Hanse et celle de l'Italie du nord, s'effectuant par des relais intermédiaires, en France ou en Allemagne). A cette date, le nombre de villes est déjà conséquent, puisqu'on dénombre plus de 170 villes de plus de 10 000 habitants selon Bairoch. Une grande partie existe déjà depuis l'époque gallo-romaine, à l'exception des villes nouvelles issues de fondations religieuses ou des grands défrichements des 12^{ème}-13^{ème} siècles, à l'ouest, des 15^{ème}-16^{ème} siècles à l'est. La distribution des tailles des villes est déjà nettement hiérarchisée : si l'insuffisance de sources statistiques ne permet pas de renseigner de manière précise le nombre de villes de moins de 10 000 habitants, et donc de construire une distribution rang-taille cohérente, on dénombre néanmoins 5 villes de plus de 100 000 habitants (Paris, Grenade et Venise en tête) et 8 de plus de 50 000. Le semis des villes est assez dense, avec en moyenne une ville tous les 20 km (à l'exception des zones de forêt, de lande ou de montagne). L'ensemble de ces caractéristiques, sans les localisations exactes des villes, permet de construire une situation théorique initiale du système des villes d'Europe, à laquelle nous pouvons appliquer les différentes règles de notre modèle d'évolution des villes⁶. La confrontation des populations et des richesses simulées avec celles observées historiquement permet de conduire la phase de calibrage, d'une part, et de modifier ou valider certaines règles du modèle, d'autre part.

⁶ Les principaux historiens des villes européennes sur lesquels nous nous sommes appuyés sont : Braudel (1979), Duby (1980), Bardet, Dupaqier (1997), Pinol (1997), Bairoch (1985, 1988, 1997).

3.1 Situation initiale simplifiée (simulations sur un semis théorique)

Afin de nous concentrer sur les règles génériques gouvernant l'évolution du système des villes en Europe, nous sommes partis dans un premier temps d'une situation initiale simplifiée, dans laquelle les villes sont réparties de manière aléatoire à l'intérieur d'un carré. Il s'agit donc de simulations théoriques, visant à reproduire les faits stylisés identifiés comme étant caractéristiques de l'évolution de pays d'urbanisation ancienne et n'ayant pas connu de bouleversement majeur, comme la colonisation (sur l'identification des principaux types de systèmes urbains dans le monde, on pourra se reporter à Bretagnolle, Pumain, Vacchiani-Marcuzzo, 2007). Nous avons généré un semis régulier triangulaire (de type christallérien), avec 34 km entre chaque point, ce qui donne 5000 points dans un carré de 5 millions de km². Pour affecter la population en 1300, nous avons divisé le carré en 16 sous-carrés et introduit un aléa dans chacun des sous-carrés : un tirage aléatoire de 62 villes (correspondant à 1000 divisé par 16) à l'intérieur de la distribution totale des villes, puis une distribution aléatoire en X et en Y (coordonnées géographiques des villes). Le résultat donne une loi lognormale à l'intérieur de chacun des 16 carrés (Figure 5). Les paramètres de cette lognormale (moyenne, écart-type et population minimale) sont identiques à ceux calculés pour la distribution observée des villes européennes en 1300.

Figure 5 : trame initiale de l'Europe théorique (réalisation : F. Paulus)



Près de 400 simulations ont été nécessaires pour améliorer le modèle théorique, effectuer des tests de sensibilité et calibrer les paramètres de manière à obtenir une validation multi-échelle⁷ (Sanders et al. 2006), allant de l'échelle macroscopique (population totale, richesse totale, nombre de villes par classe de taille et pente des graphiques rang-taille, évolution des parts d'actifs) à l'échelle mesoscopique (trajectoire de villes dans certaines régions, par exemple les gisements industriels ou les littoraux) et microscopique (population maximale à chaque époque, trajectoire des plus grandes villes, trajectoire de villes par fonction). Le modèle réussit à reproduire de manière satisfaisante l'évolution de la population totale du système, en particulier lors de périodes de récession (la grande peste, au 14^{ème} siècle) ou au contraire d'expansion urbaine forte (révolution industrielle et transition urbaine du 19^{ème} siècle, que le modèle arrive à simuler par une très forte augmentation des valeurs des paramètres de

⁷ Le protocole de cette validation multi-échelle ainsi que les macros SAS utilisées en ce sens ont été élaborés par Hélène Mathian (CNRS, UMR Géographie-cités).

croissance liée au marché). La pente de la distribution rang-taille évolue de manière cohérente et la structure hiérarchique (nombre de villes par classe de taille) est globalement satisfaisante, à l'exception des très grandes villes, sous-estimées par le modèle. En effet, alors que le nombre total de villes dans la classe de taille la plus élevée est bien ajusté par le modèle, on trouve un écart important entre la population simulée et observée des deux ou trois plus grandes villes, et cela dès 1500. Si l'on s'intéresse de plus près à ces villes, on se rend compte qu'à l'exception de la conurbation de la Ruhr en 1950, il s'agit systématiquement des villes qui ont exercé un rôle majeur dans l'économie-monde : au Moyen Âge Paris, Londres et Naples, auxquelles s'ajoutent la capitale financière Amsterdam en 1700 puis Berlin en 1950. Dès le Moyen Âge, la sphère d'influence de ces villes dépasse largement le cadre européen, que ce soit pour Naples (capitale du royaume des Deux-Siciles et tournée vers la Méditerranée) ou pour Paris (véritable place d'affaires internationale au temps des banquiers Lombards) et plus tard Londres, tournées vers l'Inde et les Amériques. Les simulations théoriques mettent en évidence la nécessité d'ajouter une nouvelle fonction au modèle, que nous avons appelé « ville mondiale » et qui caractérise ce très petit nombre de villes fortement connectées avec l'extérieur du système (pour une présentation détaillée de ces résultats, voir Pumain, Bretagnolle, Glisse 2007).

3.2 Situation initiale réelle (simulations géo-référencées)

Dans un deuxième temps, nous avons considéré en situation initiale les localisations réelles des villes et attribué à celles qui existent dès 1300 (1500 à l'est) leurs fonctions territoriales et spécialisées. Nous avons simplement appliqué les paramètres issus du modèle théorique de l'Europe, afin de comparer les résultats, c'est à dire ceux issus d'une situation initiale théorique (espacement régulier des villes, contour de l'Europe carré) et ceux issus d'une situation initiale réelle. L'interprétation des différences permet de tenir compte du rôle des configurations géographiques (les villes ne sont pas réparties de manière régulière en 1300 et s'organisent en grappe, notamment en Italie du nord et dans le nord-ouest de l'Europe) et au rôle des héritages (les villes sont caractérisées en situation initiale par leur population observée à cette date et par leurs fonctions).

La situation initiale du simulateur Europe réelle est la suivante : nous avons considéré 21 pays d'Europe (Figure 6) et pour chacun leur capitale⁸, désignée à partir de 1500 seulement. Cette date correspond approximativement à la fin de l'époque des principautés territoriales, se caractérisant par un regroupement de l'autorité et par la centralisation, sauf en Rhénanie où le morcellement territorial se poursuit. La fonction chef-lieu a été attribuée à une centaine de villes (c'est l'estimation qui en est donnée par les historiens, qui considère que cette fonction caractérise les villes de plus de 10 000 habitants au 13^{ème}-14^{ème} siècles⁹), selon des critères de taille et de localisation : dans l'est de l'Europe, les villes sélectionnées sont plus petites et acquièrent la fonction en 1500 seulement. La fonction Grand commerce a été attribuée à une cinquantaine de villes, choisies en fonction des observations historiques¹⁰. Il s'agit tout d'abord des villes maritimes méditerranéennes qui commercent avec l'Orient et le Maghreb, et des villes de la Ligue Hanséatique, sur la façade atlantique et baltique (commerce de fourrures et de bois avec l'est). Des circuits continentaux permettent de relier ces deux pôles,

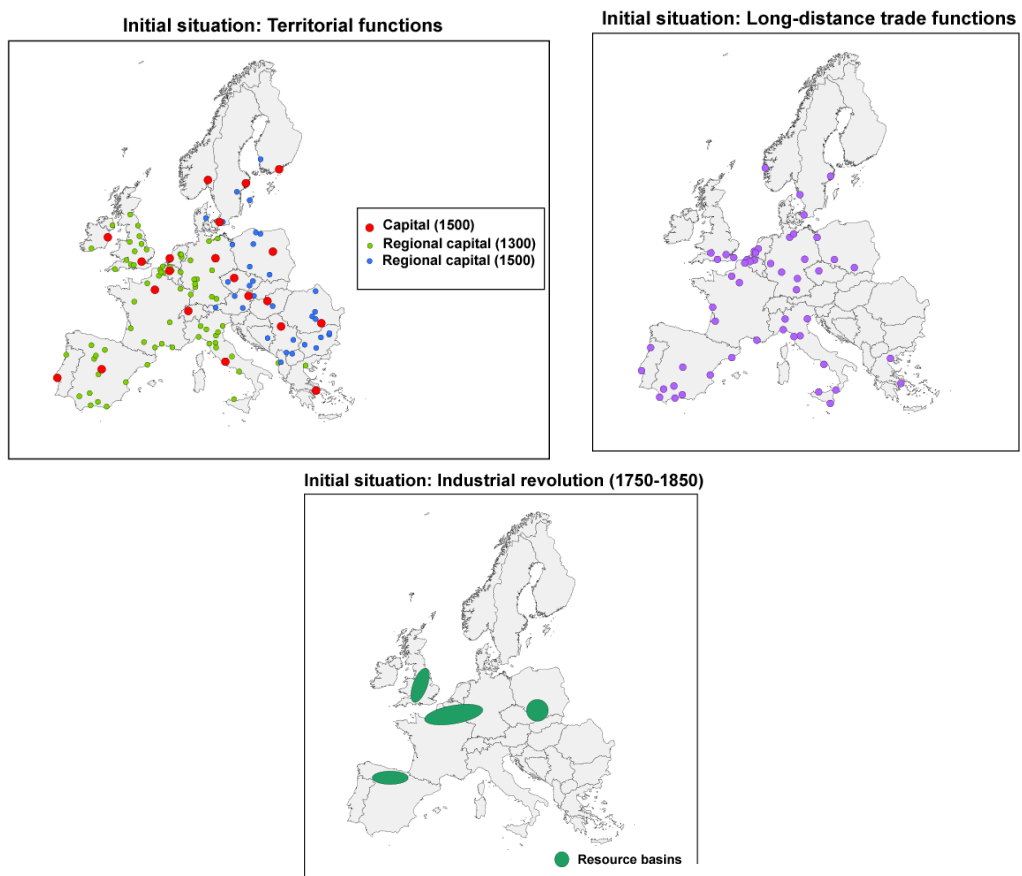
⁸ Nous n'avons pas pris systématiquement les capitales actuelles. Lorsque des changements récents de frontières ont eu lieu, nous avons systématiquement privilégié l'ancienne situation (Berlin en Allemagne, Prague capitale de la Tchécoslovaquie, Belgrade capitale de la Yougoslavie...).

⁹ Boucheron P., Menjot D. (2003), « La ville médiévale », in Pinol (dir.), *op. cit.*

¹⁰ Bairoch P., 1997, *Victoires et déboires : histoire économique et sociale du monde du XVI^e siècle à nos jours*. Paris, Gallimard, Folio Histoire ; Bairoch P., 1985, *De Jericho à Mexico, villes et économie dans l'histoire*, Paris, Gallimard, Arcades, 705 p. ; Braudel F., 1979, *Civilisation, Économie et capitalisme, XV^e – XVIII^e siècles. I – Les structures du quotidien*, Paris, A. Colin, 736 p. ; Hohenberg P. M., Lees L. H. (1992), *La formation de l'Europe urbaine, 1000-1950*. Paris, PUF collection Histoire.

passant par les foires de Champagne, puis par l'Allemagne avec l'ouverture de cols alpins. S'ajoutent à cette liste les villes tournées vers l'Atlantique (Portugal, Angleterre, Belgique et Pays-Bas), qui connaissent un essor majeur avec la découverte du Nouveau Monde. A partir de 1800, le modèle intègre le cycle d'innovation né de la Révolution Industrielle, ce qui nécessite de prendre en compte la localisation des gisements miniers et métallurgiques (Midlands, bassin franco-belge, Galicie, Silésie, Ruhr). Dans le modèle, un tiers des villes qui reçoivent la fonction industrielle sont choisies aléatoirement à l'intérieur de ces polygones, à la condition qu'elles n'aient que la fonction Central. Pour la population initiale, nous sommes partis de la base historique de Paul Bairoch, qui renseigne environ 350 villes en 1300. Celle-ci étant cependant incomplète (surtout pour les petites villes de moins de 5000 habitants), nous avons aussi considéré les villes qui émergent dans la base Bairoch dans les trois siècles suivants. Nous arrivons ainsi à un total d'environ 1000 villes de plus de 2000 habitants en 1500, ce qui est un chiffre raisonnable compte tenu des observations des historiens démographes¹¹. Pour les siècles suivants, Dans les siècles suivants, les villes qui n'existaient pas encore en 1500 sont activées progressivement, la date d'activation résultant d'un tirage aléatoire.

Figure 6 : Villes recevant des fonctions territoriales et spécialisées en 1300, 1500 et 1800

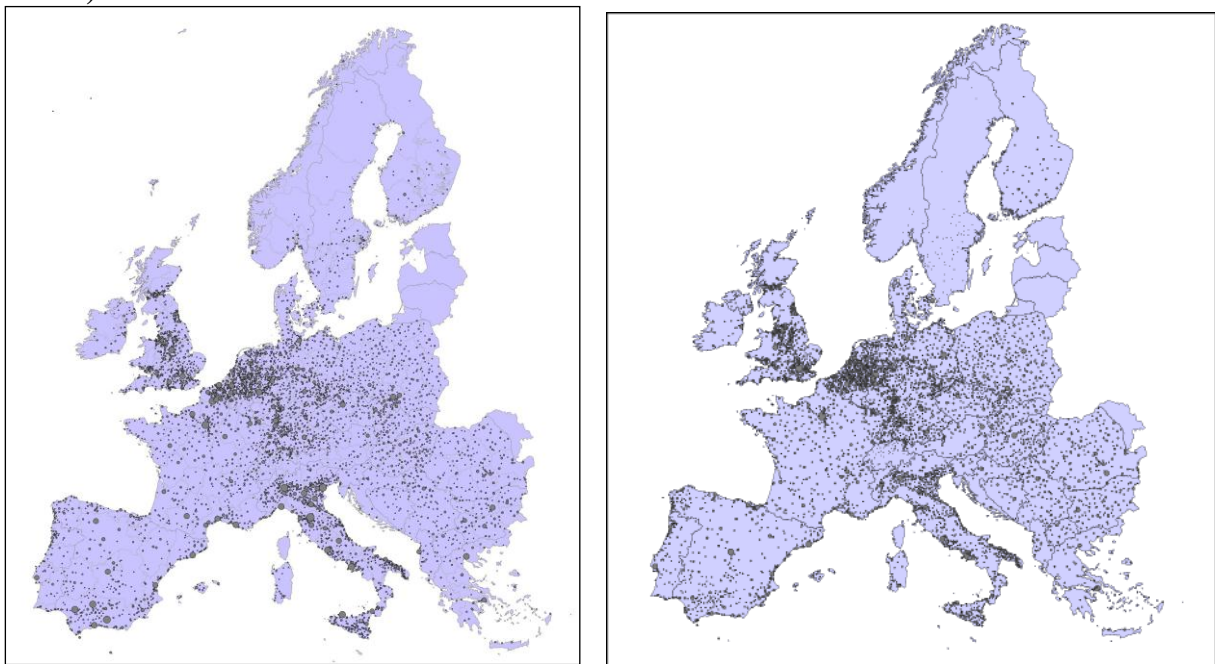


Bretagnolle A., UMR Géographie-cités, 2006

¹¹ Bardet J.-P., Dupaquier J., 1997, *Histoire des populations de l'Europe. 1 – Des origines aux prémices de la révolution démographique*, Paris, Fayard, 660 p., Pinol (dir.), *Histoire de l'Europe Urbaine*, tome 1 : De l'antiquité au XVIIIe siècle, Paris, Seuil.

Les résultats de la simulation géo-référencée ont fait l'objet de plusieurs analyses. Nous avons tout d'abord comparé la trame des villes, simulée et observée (figure 7). A première vue, la ressemblance est extrêmement forte, mais il faut noter que le semis des villes (c'est à dire leur localisation, non compte tenu de leur taille) est rigoureusement la même d'une carte à une autre, ce qui contribue pour une grande part à cette similitude. Si l'on s'intéresse aux plus grandes villes, des différences apparaissent plus nettement. Ainsi, les rapports hiérarchiques entre les tailles des villes en France ou en Espagne sont mal restitués par la simulation. Il s'agit de deux pays de tradition centralisée, ayant connu un développement important de la capitale par rapport aux autres villes. La situation initiale et les règles du modèle ne tenant pas compte des frontières historiques entre les pays (nous n'avons pour le moment qu'une portée de 500 km définie pour chaque capitale, quel que soit le pays), le modèle reproduit mal l'évolution des capitales par rapport aux villes provinciales.

Figure 7 : La trame des villes européennes en 2000, simulée (à gauche) et observée (à droite)

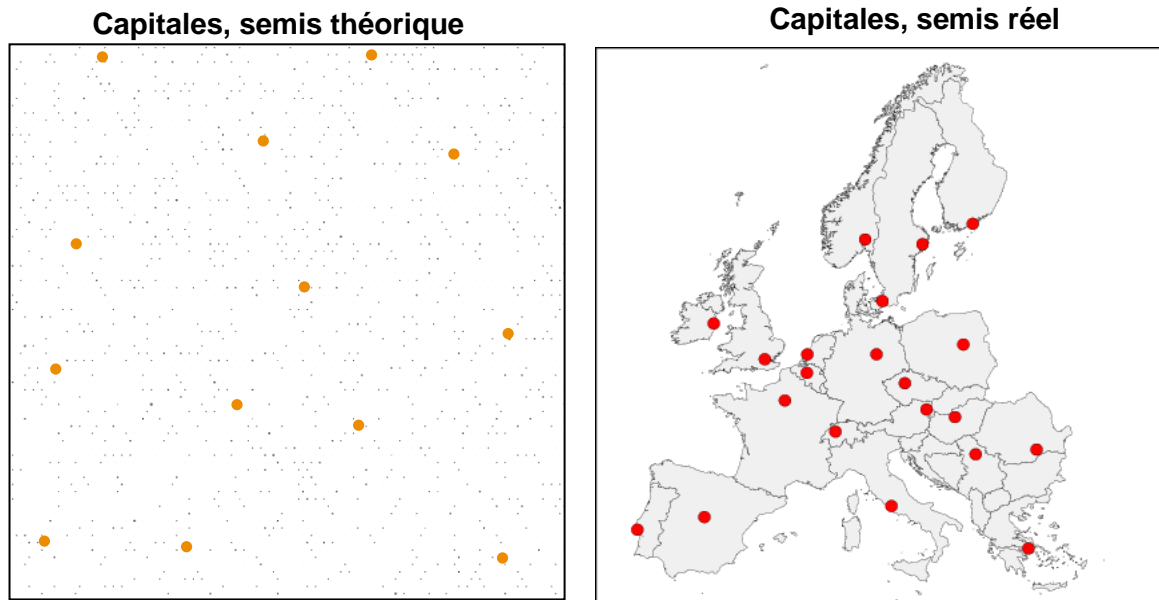


Un deuxième résultat est la forte sous-estimation de la population totale obtenue en 2000 dans la simulation géo-référencée (280 millions, au lieu des 335 millions de la simulation théorique), alors que les paramètres de croissance (démographique ou liée au marché) sont rigoureusement les mêmes. Cette différence s'explique donc par une plus grande concurrence liée au marché, responsable de pertes démographiques ou tout au moins d'attractions migratoires plus faibles.

L'analyse de l'évolution des capitales permet de mieux comprendre ce mécanisme de concurrence. L'espacement entre les capitales est très régulier dans la situation initiale théorique, alors que dans la situation initiale réelle certaines sont très proches les unes des autres et donc en situation de forte concurrence (figure 8). Dans la simulation sur un semis théorique, les paramètres relatifs à la fonction capitale ont été calibrés de manière à ce que ces villes reçoivent une croissance soutenue grâce à la taxe financière qu'elles perçoivent. Le résultat est satisfaisant puisqu'en 2000, 13 des 20 capitales font partie des 20 plus grandes villes d'Europe. En revanche, dans la simulation partant de la situation initiale réelle, seules 2 villes font partie des 20 plus grandes villes en 2000 (il s'agit de Paris et Rome). Les 19 autres s'accroissent, mais pas assez, voire stagnent ou sont en déclin. Leur position géographique

explique en partie ces évolutions, les villes situées en position centrale dans les réseaux de l'échange (Paris, Berne, Bruxelles, Rotterdam) gagnant plus celles situées à la périphérie de l'Europe (Lisbonne, Londres, Vienne, Belgrade, Athènes), sauf quand elles sont très proches les unes des autres et donc en position de concurrence (Bucarest, Varsovie).

Figure 8 : Localisation des capitales, dans la situation initiale théorique (à gauche) et dans la situation initiale réelle (à droite)



4. Modélisation du système des villes des Etats-Unis (1650-2000) et différences par rapport au style Europe

Les Etats-Unis se caractérisent, comme d'autres pays neufs, par la diffusion récente du peuplement urbain, lié à l'arrivée des colons. Les premières communautés sont fondées au XVII^e siècle sur le littoral oriental (Manhattan en 1614, Philadelphie en 1654) et se développent très lentement jusqu'au début du XIX^e siècle. La figure 7 permet d'observer un premier front pionnier, qui se déplace de l'est vers l'ouest, atteignant le Mississippi en 1850, les Montagnes Rocheuses en 1870 et la côte ouest en 1890. Un deuxième front est ouvert au XVIII^e siècle sur la façade Pacifique par les Espagnols venus du Mexique : les premières villes de plus de 5000 habitants comptabilisées dans le recensement sont San Francisco et Sacramento en 1850, suivies ensuite par Los Angeles ou Seattle. Les villes sont en moyenne beaucoup plus espacées qu'en Europe (une tous les 50 km environ en 2000), ce qui s'explique tout d'abord par leur création tardive : au delà du Mississippi, la plupart des villes sont nées ou se sont développées avec le chemin de fer, qui permet d'emblée de desservir un territoire beaucoup plus vaste que les moyens de transport rudimentaires qui ont accompagné le développement des villes européennes au Moyen Âge. La seconde explication tient au caractère très dissymétrique du semis urbain, dense à l'est mais très lâche à l'ouest, en raison des vastes zones désertiques et montagneuses. Une autre caractéristique du système des villes américaines est la croissance urbaine extrêmement rapide des plus grandes villes. Au recensement de 1790, seules 5 villes dépassent 10 000 habitants, dont New York qui ne compte à cette date que 33 000 habitants (Londres atteint alors 948 000 habitants). L'explosion urbaine qui suit l'indépendance est sans commune mesure avec la croissance qui caractérise l'Europe à la même époque : en moins d'un siècle, New York devient la deuxième ville du monde, avec plus de 3 millions d'habitants en 1900. Certaines villes comme Chicago, San Francisco, Cincinnati ou Pittsburgh connaissent au 19^{ème} siècle des taux de croissance

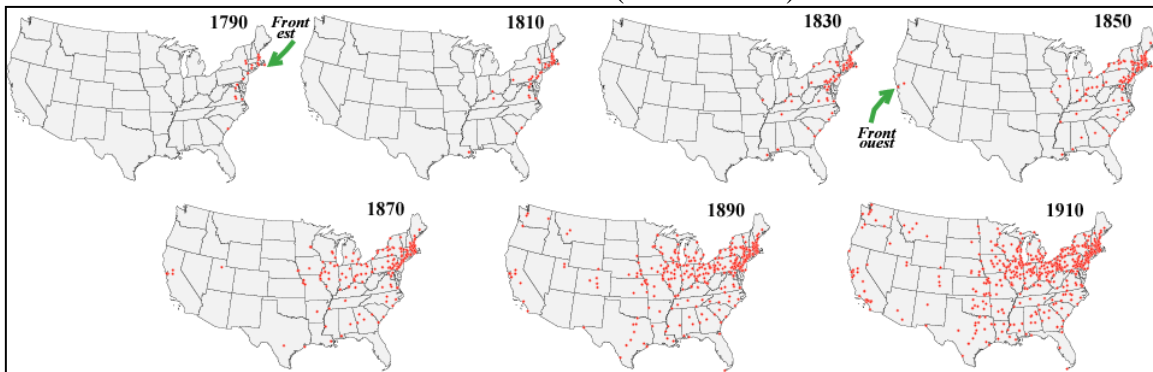
annuels de 5 à 10% (équivalents à ceux d'une mégapole d'un pays en développement dans les dernières décennies), et l'on trouve à nouveau des croissances du même ordre au Texas puis en Floride ou dans l'Arizona au 20^{ème} siècle.

4.1 Situation initiale et mécanisme de front pionnier

Dans un premier temps, nous avons implémenté un mécanisme de diffusion des villes dans l'espace, à partir de trois paramètres : le nombre de villes activées à chaque date, la largeur de la bande territoriale concernée par le tirage aléatoire et la localisation (en X) de son point le plus extrême, à l'ouest pour le premier front pionnier, à l'est pour le second. Le mécanisme de front pionnier prend effet à partir de 1800 et se termine en 1910. Avant 1800, les villes qui existent en 1790 (premier recensement de population) sont activées spécifiquement, dès qu'elles apparaissent en tant que villes dans les sources historiques¹². Au delà de 1910, des villes sont tirées aléatoirement dans tout le pays, comme dans le modèle Europe (Figure 9).

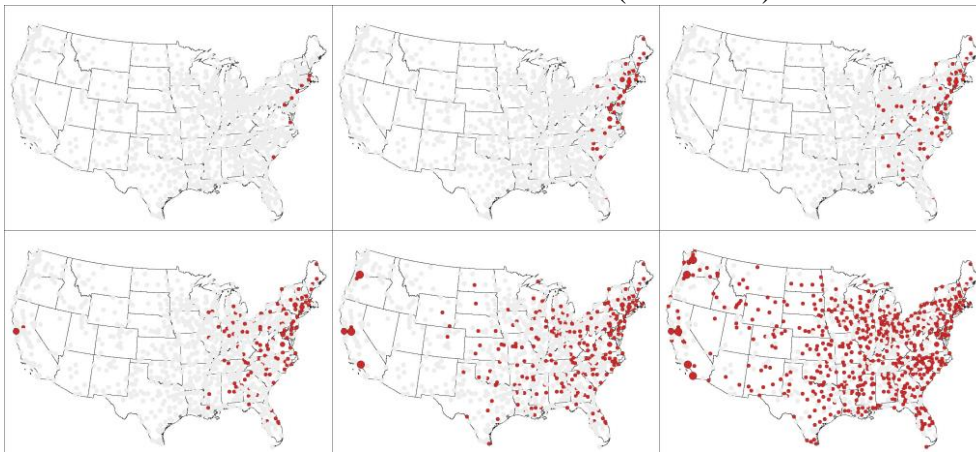
Figure 9 : Un mécanisme de front pionnier dans un pays neuf

- 9a. Evolution du semis des villes américaines (observations)



Source : Bureau du Census, Bretagnolle, Giraud 2006.

- 9b. Evolution du semis des villes américaines (simulation)

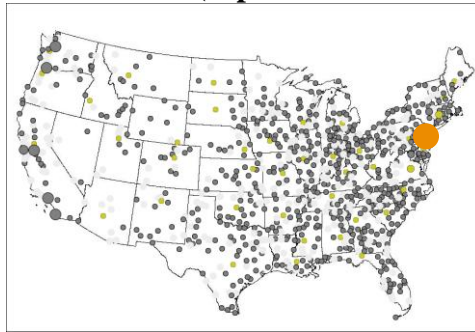


Comme pour l'Europe, nous décrivons dans la situation initiale réelle un certain nombre de fonctions. Il s'agit des fonctions centrales (la fonction central 2 est donnée d'une part aux plus grandes villes, tirées aléatoirement à chaque date, d'autre part à des villes de plus petite taille mais situées en avant du front pionnier), des fonctions territoriales (Philadelphie est capitale

¹² Gorrha-Gobin C. (1998), *La ville américaine, Espace et société*. Paris, Nathan Université, collection Géographie. Greene E. B. et Harrington V. D. (1932, reed. 66), *American population before the Federal Census of 1790*. Gloucester, Massachussets. Chudacoff H. (1981), *The evolution of American Urban Society*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall Inc.

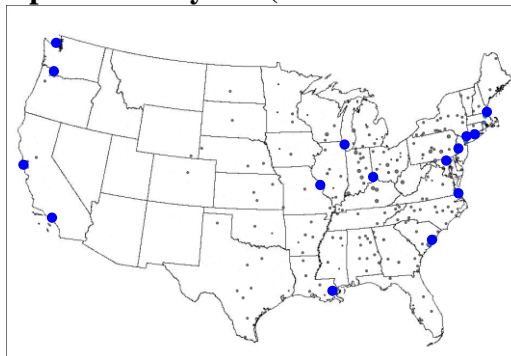
de 1790 à 1810 puis Washington, et les capitales de chaque état reçoivent cette fonction dès leur activation par le front pionnier, Figure 10) et des fonctions spécialisées.

Figure 10 : Fonctions territoriales (capitale et chef-lieux) en situation initiale



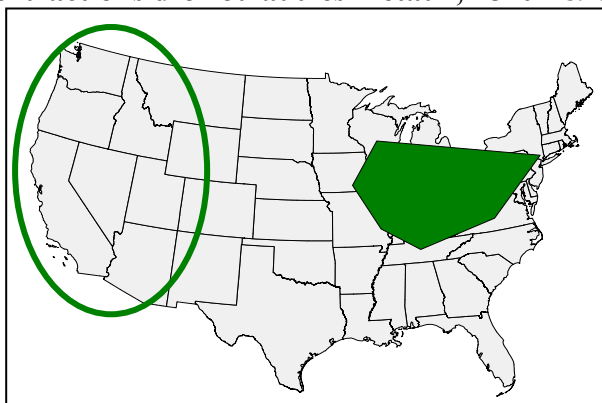
Pour la fonction spécialisée Grand commerce (cycle1), nous avons constitué trois vagues. La première décrit les grands ports de l'Atlantique (à partir de 1740) ; la deuxième est représentée par des villes maritimes mais aussi des ports fluviaux du Mississippi ou par des villes desservies par des canaux qui se spécialisent dans certains produits agricoles (céréales, coton, canne à sucre) ou dans l'esclavage, entre 1810 et 1850 (Cincinnati, Saint-Louis, Chicago, La Nouvelle Orléans, Baltimore) ; enfin, la troisième vague est constituée par les grands ports de la façade Pacifique (figure 11).

Figure 11 : Fonction spécialisée Cycle1 (Grand commerce) en situation initiale



A partir de 1830, date d'apparition de la fonction Révolution Industrielle, une partie des villes sont tirées dans un polygone spécifique, comme pour l'Europe (il s'agit du cœur industriel, s'étendant de la région des Grands Lacs au littoral Atlantique), et une deuxième vague est constituée à l'ouest par les villes situées près de gisements d'or ou d'autres métaux (figure 12)

Figure 12 : Fonction spécialisée Cycle2 (Première révolution industrielle, 1830-1870 et extractions d'or ou autres métaux, 1870-1890)



Enfin, entre 1890 et 1930, des villes recevant la fonction spécialisée Cycle3 (deuxième révolution industrielle, de l'électricité et de l'automobile) sont tirées dans deux autres polygones correspondant à des gisements pétroliers (figure 13).

Figure 13 : Fonction spécialisée Cycle3 (Deuxième révolution industrielle, 1890-1930, gisements pétroliers)



Partant de cette situation initiale, calée sur celle de l'Europe (à l'exception du mécanisme de front pionnier), nous avons dans un premier temps appliqué les paramètres issus de la simulation théorique de l'Europe. Sans surprise, les résultats se sont avérés très médiocres. La population totale est fortement sous-estimée, dès le début du 19^{ème} siècle, les parts d'actifs par secteur d'activité déclinent dès l'apparition des fonctions (centrales ou spécialisées), les villes de l'ouest puis du sud n'arrivent pas à croître car elles ne réussissent pas à s'imposer dans les réseaux d'échanges, et les grandes villes (New York, Los Angeles, Chicago etc.) ont des populations bien inférieures à celles observées historiquement. Procédant de manière chronologique, en considérant d'abord la période pré-industrielle puis chacun des cycles d'innovation successifs, nous avons progressivement modifié le modèle théorique, en introduisant de nouvelles règles et en calibrant les paramètres du modèle de façon à les adapter à la situation des Etats-Unis.

4.3 Amélioration du modèle et calibrage

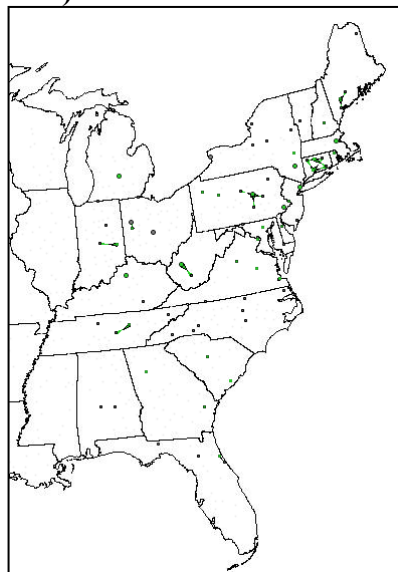
Quatre types de modifications ont été introduits dans les règles du modèle Etats-Unis :

- *Création d'une fonction Ville-frontière (1790-1900)* : les premières simulations ont permis de mettre en évidence la faiblesse des nouvelles villes, créées par le mécanisme de

front pionnier, qui sont trop petites pour pouvoir récupérer des fonctions centrales de niveau régional ou des fonctions spécialisées. Elles s'affaiblissent donc dans les décennies qui suivent leur création, au lieu de s'accroître et de s'intégrer dans le marché d'échange comme elles l'ont fait historiquement. En effet, les historiens ont montré que dans la partie est des Etats-Unis les villes du front pionnier (*urban frontier*, selon l'expression de Richard Wade¹³) apparaissent en avant du front avant même que le sol environnant ne soit travaillé pour le rendre exploitable. Elles émergent comme des avant-postes et des dépôts commerciaux à partir desquels le peuplement irradie (la croissance des villes rend les récoltes de l'ouest plus commercialisable et augmente la valeur de la terre. A son tour, l'expansion de la frontière agricole dynamise la croissance des villes, qui constituent des points d'échanges). Nous avons donc introduit un nouveau mécanisme dans le modèle, donnant (au moyen d'un paramètre) une croissance démographique conjoncturelle plus forte pour les villes situées en avant des fronts pionniers, Est et Ouest, afin de stimuler leur croissance et de leur permettre d'accéder ensuite à d'autres fonctions que Central1, donnée à toutes les villes.

- *Introduction tardive des fonctions de commerce régional* (1850 pour Central2, 1870 pour Central3) : l'un des apports extrêmement intéressant du modèle multi-agent est la mise en relation du nombre de villes exerçant une fonction centrale, de la taille du pays et de la portée dépendant des moyens de transport de l'époque. Les résultats sont frappants : avec 80 villes de plus de 5000 habitants en 1840, desservant un territoire allant jusqu'au Mississippi (à 2000 kilomètres de la côte est) et une portée maximale d'une centaine de kilomètres pour chaque ville (voyage dans la journée avec les transports de l'époque), il n'est pas possible de faire émerger les fonctions Central2 et Central3 (qui existent pourtant à la même époque dans le modèle Europe) sans que cela se traduise par des pertes d'actifs dans ces fonctions. La majorité des villes recevant ces fonctions n'ont en effet pas assez de villes clientes dans leur voisinage pour que leur production soit écoulee, et se retrouvent donc avec des invendus massifs (figure 14).

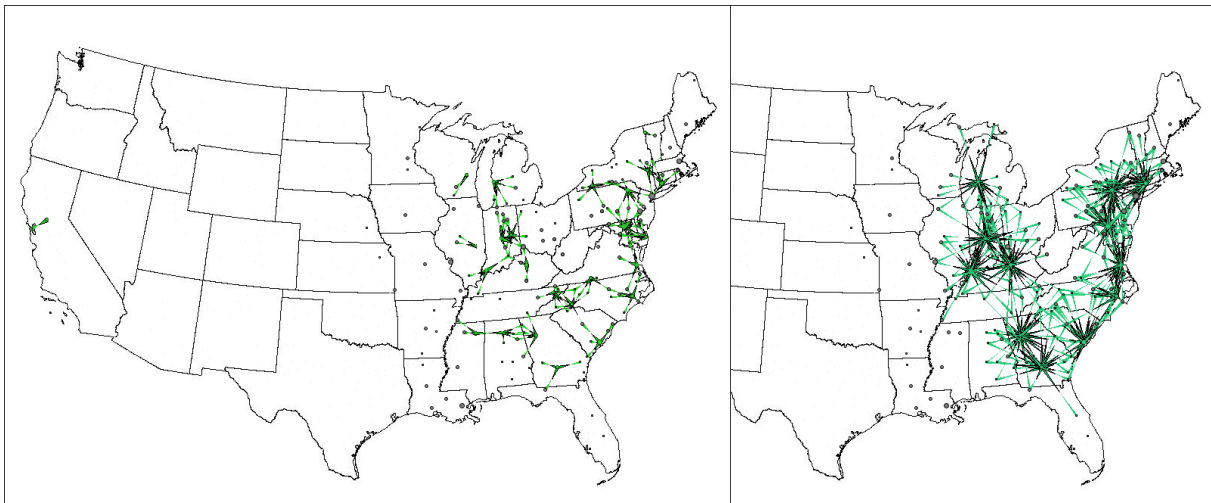
Figure 14 : Villes ayant la fonction central2 en 1840 (en vert) avec leur réseau d'échange (portée de 100 km). Nombre total de villes à l'époque : 77



¹³ Richard C. Wade, *The urban Frontier, 1790-1830*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1959.

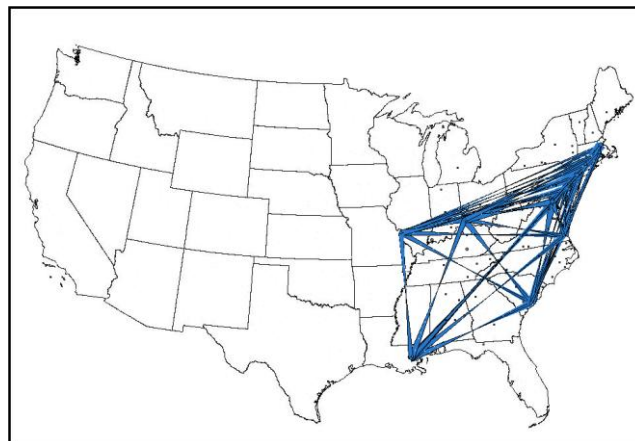
Nous avons donc introduit les fonctions centrales de niveau régional plus tard qu'en Europe : en 1850 pour Central2 et en 1870 pour Central3. La figure 15 montre qu'en 1870 les villes ayant ces fonctions ont suffisamment de villes clientes dans leur portée pour que leur production soit correctement écoulee. En conséquence, cela signifie que lors de la phase d'émergence du système, la croissance des villes repose essentiellement sur des fonctions spécialisées, à la différence de ce que l'on observe en Europe (selon les historiens, une partie des villes européennes fondent leur croissance, tout au long du Moyen Âge, sur un commerce essentiellement local et régional).

Figure 15 : Fonction central 2 (à gauche) et central 3 (à droite) et réseaux d'échange associés en 1870



- *Impulsion donnée par l'environnement international (18^{ème}-20^{ème} siècles)* : lors des premières simulations, nous avons constaté une stagnation ou un déclin des actifs dans les fonctions spécialisées, pour les mêmes raisons que celles évoquées à propos des fonctions centrales. En mettant la même productivité par habitant que pour l'Europe, les villes spécialisées dans le commerce international (cycle 1) ne réussissent pas à écouler leur production, en raison du très faible nombre de villes clientes (figure 16).

Figure 16 : Villes ayant la fonction Cycle1 en 1840 avec leur réseau d'échange (portée de 2000 km). 11 villes en tout, pas d'autres clientes



Les observations historiques montrent que les villes du grand commerce (ports de l'Atlantique, échangeant des fourrures, des céréales, du poisson ou du bois auxquels s'ajoutent ensuite les ports fluviaux du Mississippi, à l'époque de l'agriculture spécialisée : coton, canne à sucre, et de l'esclavage, puis les villes de la côte ouest, avec le bois) sont largement tournées vers le commerce international (Europe, Afrique, Caraïbes, Amérique du sud, Canada). Nous avons donc spécifiquement introduit cette demande internationale dans notre modèle, sous la forme d'un paramètre fixant une quantité de demande supplémentaire par fonction spécialisée et accordant en échange les ressources financières nécessaires pour s'acquitter des ventes. Les cycles d'innovation suivants ont fait l'objet du même mécanisme : cette demande supplémentaire s'est avérée nécessaire pour générer les croissances exceptionnelles des villes spécialisées dans les cycles suivants, celui de la révolution industrielle (Pittsburg, passant de 12000 habitants en 1830 à 450 000 en 1900), celui de la deuxième révolution industrielle (San Antonio au Texas, passant de 53 000 habitants en 1900 à 500 000 en 1950) ou celui de la révolution des NTIC et du tourisme (Orlando en Floride, passant de 36 000 habitants en 1940 à 430 000 en 1970). Cette très forte ouverture vers le marché international caractérise ainsi les Etats-Unis dès l'apparition des premières villes, à la différence de ce qu'on peut observer pour l'Europe.

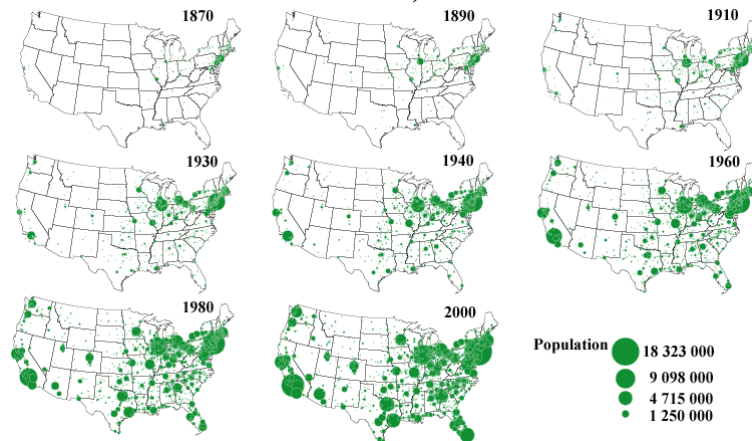
- *Impulsion initiale donnée aux gisements associés aux innovations (1850-1950)* : la prise en compte de l'environnement international permet de générer globalement les croissances exceptionnelles associées aux nouveaux cycles, mais pas la distribution de cette croissance dans l'espace. Une autre caractéristique des villes américaines est en effet la corrélation très étroite qui existe entre chaque cycle d'innovation et les gisements associés, comme on peut le constater dans le tableau des données historiques (Figure 17). Nous avons fait apparaître dans ce tableau les villes les plus grandes et repéré par une couleur chacun des 4 cycles d'innovation.

Figure 17 : Croissance urbaine et effets de gisement aux Etats-Unis
- Evolution des populations des villes (base de données historique, Bretagnolle et Giraud 2006)

NOMAG	1820	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930	1940	Pop0del5(Pop0del5)	Pop0del60(Pop0del60)	Pop0del7(Pop0del7)	Pop0del8(Pop0del8)
New York	123706	348943	643165	1080330	1338391	1802770	2362573	3437202	4766833	5620048	7006800	7950530	9555943	10894633	11571899	1172261
Philadelphia	105311	230512	302413	594231	727202	925252	1152251	1396932	1643546	1952250	2096180	2253031	3671048	4342897	4817914	47166
Boston	43298	102472	155245	202977	250526	362639	448477	692678	1076817	1409884	1567839	1644794	2369986	2589301	2753700	27633
Baltimore	62738	169054	212418	267354	332313	434439	508957	558485	733826	804874	859100	1337373	1727023	2070670	21744	
New Orleans	27176	102193	116375	168675	191418	216090	242039	207104	339075	397219	459762	505416	695405	969490	1045909	11871
Cincinnati	9642	46336	116435	161044	216239	253139	296906	325905	373776	512651	569575	593303	904402	1071624	1384851	14014
Chicago			29963	112172	289977	503185	1099850	1714885	2219284	2872206	3774292	3980997	5127212	6220913	6978947	71036
San Francisco			34776	56802	749473	233959	298997	342782	416912	506676	661108	1156804	2135934	2648762	3109519	32506
Pittsburgh	7248	21115	46601	49221	86076	156389	239617	451512	533905	732603	890636	892585	2213236	2405435	2401245	22638
Detroit		9102	21019	45619	79577	116340	205876	285704	465766	1088792	1853914	2026628	3016197	3762360	4199391	43534
Cleveland		6071	17034	43417	92829	160146	261353	381768	560663	881101	1121572	1116596	1465511	1796595	2064194	18988
Milwaukee			20061	45246	71440	115587	204468	285315	373857	470892	668930	688484	871047	1194290	1403688	13971
Minneapolis			13066	46887	164738	202718	301408	615280	745971	791950	1116590	1482030	1813647	21133		
Omaha			16088	30518	140452	102555	124096	191601	214006	265283	366395	458773	540142	5696		
Kansas City			32280	55785	132716	163752	248381	437273	536899	536702	814357	1039493	1253916	13271		
Denver				35629	70673	133859	213381	256941	267861	322412	563832	929383	1227529	16206		
Indianapolis			8091	18611	48244	75056	165436	169164	233650	314194	364161	386972	551777	697567	1109882	11668
Toledo				13768	31584	50137	81434	131822	168497	243164	290718	282349	395551	456931	682571	7911
Portland						17577	46385	90426	207214	258288	301815	324182	704829	821897	1009129	12426
Atlanta			9554	21789		37409	65533	89872	154939	200616	263642	331252	671797	1011788	1390164	20299
Grand Rapids			8085	16507		32016	60279	87595	112571	137634	168992	164282	286292	363187	539225	6016
Spokane						19922	36948	104402	104437	115514	122001	221581	276333	287487	3416	
Seattle						42837	80671	137169	315312	365583	368302	732992	1107213	1421869	16074	
Des Moines				12035	22408	50093	62139	86368	128466	142559	159819	226010	266315	286101	338	
Dayton				11267	20038	21837	26872	35254	43028	122638	141047	155781	234256	270058	362638	3833
Salt Lake City				12854	20768	44843	53531	92777	118110	140267	149934	274895	383035	557635	6495	
Wilmington			13979	21258	30841	42478	61431	76508	87411	110168	106597	112502	268387	366157	499493	5233
Waterbury			5137	10004	10826	17800	26646	45859	73141	106766	114217	114702	139061	160951	178244	1954
Canton						12258	26189	30667	50217	104519	131306	135045	283194	340345	372210	4044
Gary						16802	55378	100426	111719	133911	136815	157358	202548	257358	333367	6427
Oklahoma City						10037	64205	91295	185389	204424	325352	511833	640899	7788		
Flint						13103	38550	91599	156492	151543	270963	374313	496658	4504		
South Bend						13280	21819	35999	65570	86178	132823	129566	205068	236614	245445	2411
South Bend						13280	21819	35999	65570	86178	132823	129566	205068	236614	245445	2416
Hammond						12376	40023	71971	131642							
Los Angeles						12183	50395	148406	318188	650615	1567528	2189708	4151687	6038771	7032075	74775
Oakland					10500	34555	46632	85900	158174	245067	330551					
Akron					10006	16512	27601	42728	69067	237446	298771	289364	410032	513569	679239	6603
San Antonio			8235	12256	20590	37673	53321	96614	161379	231542	253854	500460	687151	884014	10719	
Dallas					10358	38067	42638	92104	158976	260475	319490	614799	1036601	1559590	29570	
Youngstown					15435	33220	44885	79066	143595	195924	193244	528498	636525	683178	6596	
Duluth						33115	52969	78466	138588	137576	136201	252777	276596	265390	2666	
Houston					16513	27557	44633	78800	138276	282352	384514	806701	1243158	1985031	29053	
Fort Worth						28076	26688	73312	106482	163447	177662	361253	573215	762086		
San Diego						16159	17700	39578	74361	147985	213685	556808	1033011	1357854	18618	
Long Beach								17809	55593	142032						
Tulsa						18182	72075	141258			142157	251686	418974	476945	6571	
Austin						11013	14575	22258	29860	34876	53120	87930	160980	212136	295516	5366
Baton Rouge						10478	11269	14897	21782	30729	34719	158236	230058	285167	4941	
Galveston					13818	22248	29084	37789	36981	44255	52938	60862	113996	140364	169812	1959
Jacksonville						17201	28429	57699	91558	128949	173065	304029	455411	528965	7375	
Miami								28571	110637	228196	465094	935047	1267792	18257		
Tampa								15839	37782	51608	101161	108391	409143	772453	1012594	15681
Allentown			8025	13884	18003	25228	35416	51913	73502	92593	155394	437624	492168	543551	6354	
San Jose					12567	18060	21500	28946	39642	57661	68457	290547	642315	1064714	12950	
San Bernardino							12779	18721	37481	57970	281642	809782	1143146	15581		
Sacramento			6320	13785	16283	21420	26386	29282	44696	65908	93750	105958	277140	502778	800592	10140
Fresno						10818	12470	24892	45086	52513	60685	276515	365945	413053	5146	
Phoenix								11134	29053	48118	65414	331770	663510	967522	15090	
Stockton				10066	10282	14424	17506	23253	40296	47963	54714	200750	249989	290208	3473	
Albuquerque								11620	15157	26570	33449	145673	262199	315774	4544	
Orlando									27330	36736	114950	318487	428003	7000		
Vallejo								11340	21107	16072	20072	104833	134597	169941	2352	
Anaheim									52177	53394	96194	703925	1420386	19327		
Fort Lauderdale										17996	36328	339948	620100	10182		
Oxnard										21567	40265	376430	5291			
Tucson									13193	20292	32506	35752	45454	265660	351687	5314

On constate que la plupart des villes qui émergent brutalement lors d'un nouveau cycle sont localisées dans des régions très spécifiques. On explique ainsi l'essor massif et brutal des ports de l'Atlantique nord (New York, Philadelphie et Boston), au début du 19^{ème} siècle, des ports de l'Atlantique sud et du Mississippi (Baltimore, Cincinnati, Nouvelle Orléans, Saint-Louis) en lien avec l'agriculture spécialisée et l'esclavage, Pittsburgh, Chicago ou Cleveland avec la révolution industrielle dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, San Francisco, Denver ou Seattle avec la ruée vers l'or à la fin du 19^{ème} siècle, Los Angeles avec le boom pétrolier et la spéculation foncière liée au cadre de vie dans les années 1900-1930, Dallas et Houston avec les gisements pétroliers à la même époque, Miami et les villes de Floride et celles de l'Arizona avec le tourisme et la spéculation foncière dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle (figure 18). Nous avons donc implémenté un nouveau mécanisme dans notre modèle, orientant une partie de la demande vers les gisements du moment lors de la mise en place du nouveau cycle.

Figure 18 : Croissance urbaine et effets de gisements.
- Evolution de la trame des villes (base de données historique, Bretagnolle et Giraud 2006)



Ces nouvelles règles permettent de calibrer le modèle Etats-Unis et d'obtenir des résultats très satisfaisants, tant dans la trajectoire macroscopique du système (population totale, population par classe de taille, parts d'actifs par secteur, figure 19) que dans les trajectoires régionales (villes de l'est, du Mississippi, du cœur industriel, de la côte ouest, du Texas ou de la Floride) ainsi que dans les trajectoires individuelles (New York, restant constamment à la tête du système, mais aussi certaines villes de l'est comme Philadelphie ou Boston, montée en puissance des métropoles à la tête des autres régions ensuite, figure 20). Il reste à introduire, comme pour l'Europe, une nouvelle fonction caractérisant les villes mondiales.

Figure 19 : Evolution des parts d'actifs par secteur

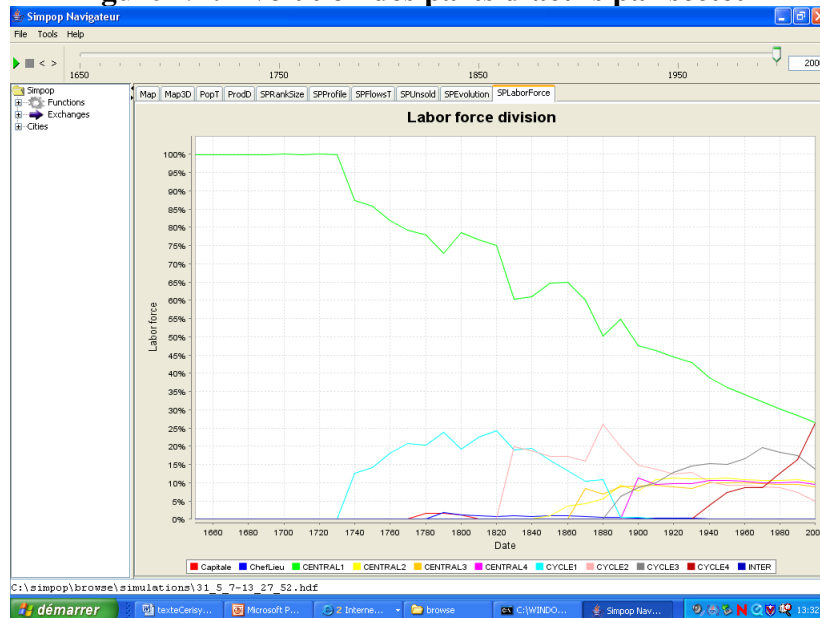


Figure 20 : Population des villes en 2000 (simulation)



Conclusion

L'utilisation d'un modèle multi-agent pour simuler l'émergence et l'évolution de systèmes de villes dans différentes parties du monde nous a permis de construire un cadre pertinent pour la comparaison, qui met en évidence des propriétés communes et des spécificités propres à tel ou tel type de système. A partir d'un socle commun, consistant dans un modèle générique d'évolution, il devient possible, grâce aux allers-retours entre la simulation et l'observation historique, de faire apparaître progressivement les règles nécessaires pour modéliser chaque type de système. Le modèle multi-agent est alors utilisé comme un filtre, comme le sont d'autres familles de modèles connus en géographie (modèle gravitaire, modèle de régression etc.). Dans l'exploration qui est décrite ici des villes d'Europe et des Etats-Unis dans la longue durée, cette démarche a permis de mettre en évidence des caractéristiques communes aux deux systèmes : le rôle des cycles d'innovation dans la croissance urbaine, l'impact de l'accroissement de la portée des échanges sur la hiérarchie urbaine, la nécessité du recours à une nouvelle fonction caractérisant les villes de rayonnement international, dès la mise en place du système.

Mais la modélisation a aussi permis de mettre en évidence un certain nombre de différences, qui tiennent dans la forme de l'occupation de l'espace par les villes.

Tout d'abord, la coïncidence temporelle entre la mise en place du système d'échanges inter-urbains et la révolution des transports (bateaux à vapeur, trains), qui permet d'embrasser des portées quatre fois plus grandes que celles qui étaient possibles lorsque la trame urbaine s'est mise en place en Europe, donne aux fonctions spécialisées un rôle moteur dans la croissance urbaine. La faiblesse du nombre de villes (et donc de clientes potentielles pour les fonctions centrales de niveau régional) est ainsi comblée par la possibilité d'écouler des productions spécialisées à l'échelle du pays (de la taille du continent européen) et vers l'international.

Une deuxième caractéristique des villes des Etats-Unis, liée aussi à la mobilisation massive des technologies de transport et d'information, est la mobilité très forte à l'intérieur du marché du travail. Les trajectoires tout à fait exceptionnelles des villes touchées par un cycle d'innovation, qui présentent des croissances annuelles de 5 à 10% et passent, en quelques décennies, du statut de simple bourg à celui de métropole nationale ou internationale, ne sont possibles qu'au prix de flux migratoires extrêmement massifs, non seulement en provenance de l'étranger mais aussi à l'intérieur du pays. Cette réactivité très forte de la main-d'oeuvre a été mise en évidence dans la littérature et apparaît nettement dans les paramètres qui lui sont consacrés dans le modèle, dont les valeurs sont beaucoup plus fortes que pour l'Europe.

Enfin, une dernière caractéristique dans le rapport à l'espace des villes américaines est liée cette fois à la taille et à la diversité géographique du pays, qui permet une très forte spécialisation des villes associées à des effets de gisement. Ces villes peuvent se permettre dans un premier temps d'être fortement monospécialisées, car elles trouvent grâce aux moyens de transport très performants des débouchés d'emblée à l'échelle de cet énorme pays. Elles peuvent ensuite diversifier leur production et devenir concurrentielles dans d'autres secteurs d'activité.

Il reste à déterminer si ces différentes manifestations d'un rapport particulier à l'espace sont propres à l'ensemble des Pays neufs, dans lesquels les réseaux de villes sont apparus à l'époque des transports rapides, ou si elles restent spécifiques aux Etats-Unis, pays de très grande taille présentant une grande diversité géographique. Les simulations en cours portant sur un autre pays neuf, l'Afrique du Sud, devraient bientôt nous permettre d'apporter une réponse à cette question.

Références bibliographiques

- Bairoch P., Batou J., Chèvre P., 1988: La population des villes européennes. Banque de données et analyse sommaire des résultats: 800-1850. Centre d'Histoire Economique International de l'Université de Genève, 339 p.
- Bretagnolle A., Daudé E., Pumain D. (2006), « From theory to modelling : urban systems as complex systems », in *Cybergeo* 335, 26 p.
- Bretagnolle A., Giraud T., Mathian H. (2007), « L'urbanisation des Etats-Unis, des premiers comptoirs coloniaux aux Metropolitan Areas (1790-2000), in *Cybergeo* (à paraître).
- Bretagnolle A., Glisse B., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C., (2006), « Emergence et évolution des systèmes urbains : un modèle de simulation en fonction des conditions historiques de l'interaction spatiale ». Rapport final de l'ACI *Systèmes Complexes en SHS*, juin.
- Bretagnolle A., Pumain D. (2005), "Artificial intelligence and collective agents : a generic multi-agent model for simulating the evolution of urban systems (Simpop2)", Poster presented at the *European Conference in Complex System (ECCS'05)*, Paris, November 2005.
- Bretagnolle A., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C. (2007), « Les formes des systèmes de villes dans le monde », in Pumain, Mattéi (dir), *Données Urbaines*, tome 5, Paris, Economica.
- Bretagnolle A., Robic M.-C (2005), « Révolution des technologies de communication et représentations du monde », -1 : « Monde-point et monde difforme », -2 : « Du petit monde au monde sans échelles », in *L'Information Géographique*, Juin, vol. 69
- Bretagnolle A., Robic M.-C (2005), « Révolution des technologies de communication et représentations du monde », -3 : « Au risque de l'expérimentation », in *L'Information Géographique*, Septembre, vol. 69.
- Bura S. Guérin-Pace F. Mathian H. Pumain D. Sanders L. 1996, Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 2, 161-178.
- Chudacoff H. (1981), *The evolution of American Urban Society*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall Inc.
- Crozet Y., Joly I. (2004), "Budget-temps de transport: les sociétés tertiaires confrontées à la gestion paradoxale du bien le plus rare", in *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°45/2004, pp. 27-48.
- Gorrha-Gobin C. (1997), *Los Angeles. Le mythe américain inachevé*. Paris, CNRS éditions.
- Gorrha-Gobin C. (1998), *La ville américaine, Espace et société*. Paris, Nathan Université, collection Géographie.

- Guérin-Pace F. (1993), *Deux siècles de croissance urbaine*. Paris, Economica, collection Anthropos.
- Moriconi-Ebrard F., 1994, *Géopolis, Pour comparer les villes du monde*, Paris, Anthropos, Economica, Collection Villes, 246 p.
- Paulus F. 2004, *Coévolution dans les systèmes de villes : croissance et spécialisation des aires urbaines françaises de 1950 à 2000*. Université Paris 1, thèse de doctorat.
- Pumain D. (ed.), 2006, *Hierarchy in Natural and Social Sciences*. Springer, Methodos Series.
- Pumain D. 1997, *Vers une théorie évolutive des villes*. *L'Espace Géographique*, 2, 119-134.
- Pumain D., Bretagnolle A., Glisse B. (à paraître 2007), « Modelling the future of cities », in *Complexus, Selected papers from the European Conference on Complex Systems (ECCS'06, Oxford)*.
- Sanders L. Pumain D. Mathian H. Guérin-Pace F. Bura S. (1997), "SIMPOP: a multi-agent system for the study of urbanism", *Environment and Planning B*, 24, p. 287-305.
- Sanders L., Favaro JM., Glisse B., Mathian H., Pumain D., (2006), *Artificial intelligence and collective agents: the EUROSIM model*, Cybergeog.
- Vance J. E. (1990), *Capturing the Horizon. The Historical and Geography of Transportation since the Sixteenth Century*. Softshell Books edition.
- Vance J. E. (1995), *The North American Railroad: its Origin, Evolution, and Geography*. John Hopkins University Press, 348 p.