

Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents

Anne Bretagnolle, Denise Pumain

▶ **To cite this version:**

Anne Bretagnolle, Denise Pumain. 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, 2010, Philosophie des Sciences. halshs-00159894v3

HAL Id: halshs-00159894
https://shs.hal.science/halshs-00159894v3

Submitted on 28 Oct 2010

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.

COMPARER DEUX TYPES DE SYSTEMES DE VILLES PAR LA MODELISATION MULTI-AGENTS (EUROPE, ÉTATS-UNIS)

Anne Bretagnolle, Denise Pumain (Université Paris 1, UMR Géographie-cités)[1]

Introduction

La théorie des systèmes complexes constitue un cadre de formalisation pour des phénomènes observables où des entités, engagées dans des interactions non déterministes, construisent des organisations à des échelles de temps, d'espace et de nombre qui dépassent celles des trajectoires individuelles. Cette propriété d'émergence à un niveau donné peut elle-même, lorsque l'organisation garde une structure durable, donner lieu à l'apparition d'un niveau supérieur, constitué d'autres entités. En sciences sociales, analyser un système en ces termes conduit à compléter les explications de l'évolution des entités, classiquement conçues, par exemple dans le cas des villes, à partir de déterminants politiques, économiques ou symboliques, par la mise en évidence des relations d'interdépendance entre différents niveaux d'émergence. En ce sens, la théorie des systèmes complexes apporte une autre perspective pluridisciplinaire pour la construction d'une théorie géographique des villes (Pumain, 1997 et 2006-a). Cette théorie peut être mise à l'épreuve grâce à des modèles. Les systèmes multi-agents, empruntés à l'intelligence artificielle (Ferber 1995), sont particulièrement bien adaptés pour traduire le formalisme sous-jacent à cette théorie, car ils mettent en scène de multiples entités dotées d'autonomie et de capacités interactionnelles. Les modèles multi-agents sont encore peu appliqués aux systèmes de villes, que nous définissons comme des réseaux d'entités urbaines en interaction forte dans un même territoire, co-évoluant du fait de leur engagement dans des réseaux d'interdépendances multiples et de portées variables au cours du temps. L'originalité de notre démarche est d'utiliser le formalisme des agents pour représenter les villes, en tant qu'entités collectives.

Les systèmes de villes sont caractérisés par des régularités fortes, qui sont autant de propriétés émergentes *:* lois d'échelle, décrivant la répartition des spécialisations économiques en fonction de la taille des villes *;* forte différenciation de la taille des villes selon une distribution lognormale ou une loi de Pareto *;* lois de l'équilatérie et des distances multiples de Léon Lalanne, mettant en relation l'espacement des villes, leur taille et leurs fonctions de desserte du territoire, comme le fera plus tard Walter Christaller dans sa théorie des lieux centraux. Ces propriétés émergentes peuvent être retrouvées par la simulation, dans un modèle théorique de l'évolution des systèmes de villes. Une fois construit, ce modèle peut être soumis à des expériences, destinées notamment à identifier les modifications qui doivent lui être apportées pour simuler les spécificités de tel ou tel système de villes dans le monde. L'hypothèse centrale est qu'une dynamique commune, propre aux systèmes de villes, peut être modulée, différenciée, par des contextes historiques ou géographiques différents. Au lieu de poser *a priori* ces conditions comme explicatives du processus d'évolution urbaine dans son ensemble, comme c'est souvent le cas lorsque l'histoire des villes est analysée pour un pays ou pour un continent, nous proposons de les faire apparaître comme l'explication des écarts observés à un modèle général de la dynamique des systèmes de villes.

Pour mener à bien cette exploration, nous nous appuyons sur l'expérience du laboratoire Géographie-cités, qui a élaboré dès les années 1990 un modèle multi-agents appelé Simpop (Bura et al, 1996, Sanders et al, 1997). Dans le cadre d'une collaboration plus récente avec le Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (Glisse 2007), 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

[1] Chapitre paru dans Weisbuch et Zwirn (eds), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ? Langages, réseaux, marchés, territoires*. Paris, Vuibert, collection Philosophie des Sciences, p.271-299.

d'échanges. Ces villes sont rendues hétérogènes par la diversité de leurs fonctions socio-économiques (concept de fonction urbaine) et par leur plus ou moins bonne insertion dans les réseaux d'échanges (concept de situation géographique). Différents modèles spécifiques ont été construits à partir du modèle générique, par exemple le modèle Eurosim (Sanders et al, 2007). Les applications que nous présentons ici s'inscrivent dans une temporalité longue (3 à 7 siècles) et s'intéressent à reproduire des faits stylisés plutôt que des phénomènes observés. Le processus de modélisation est étroitement guidé par un recours constant aux sources (population des villes, activités économiques, réseaux de transport), le système simulé étant évalué tout au long de son évolution par une confrontation avec ces données historiques. Nous comparons ici les modalités d'évolution des systèmes de villes dans les pays anciennement urbanisés (illustrés par le cas de l'Europe, entre 1300 et 2000) et ceux des pays neufs (l'exemple choisi est celui des États-Unis, de 1650 à 2000). Les simulations mettent 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 par les villes.

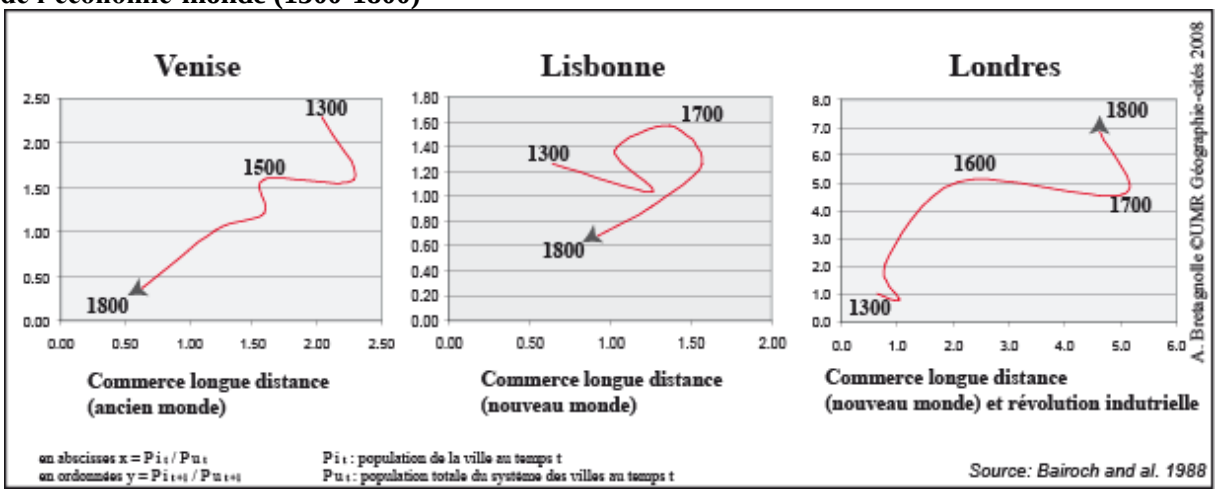
I/ LES SYSTEMES DE VILLES DANS LE CHAMP DE LA COMPLEXITE

La description de certaines propriétés structurelles ou dynamiques des systèmes de villes permet d'identifier différentes caractéristiques propres aux systèmes complexes, qui tiennent tant à la nature des interactions entre les différents éléments qu'à l'observation de propriétés émergentes au niveau macroscopique ou à la nécessité d'ancrer la définition des entités qui composent le niveau mésoscopique dans un référentiel espace-temps.

1) Des interactions multi-échelles et de portée variable

Si les villes font système par la multiplicité des liens, matériels et immatériels, qui sont tissés à chaque époque, il est impossible de dresser une liste exhaustive ou même simplifiée de ces réseaux, non seulement en raison du nombre de flux mais aussi de la complexité due à leur imbrication selon plusieurs échelles spatiales *:* certaines villes sont immergées à la fois dans des réseaux se déployant à un échelon local (l'hinterland ou la région complémentaire de Walter Christaller), mais aussi à un niveau régional impliquant parfois plusieurs États (les villes de la Hanse au Moyen Age, les villes du Mississippi à l'époque de la navigation à vapeur) voire mondial pour celles qui participent de l'économie-monde, et cela dès le Moyen Age. À la complexité de ces interdépendances multi-niveaux s'ajoutent des transformations historiques de la dimension des interactions, liées à l'évolution des techniques de transport, d'information ou de stockage. Ces innovations permettent non seulement un accroissement des portées et des trafics mais aussi des changements notables dans la configuration des circuits de l'échange. Par exemple, les villes de l'Atlantique sont promues au détriment des villes méditerranéennes grâce aux progrès de la navigation maritime et à la découverte du Nouveau Monde, à la fin du Moyen Age. La plupart de ces dernières sont détrônées ensuite par les villes de la révolution industrielle, propulsées au premier plan de la scène internationale par les technologies dérivées de la machine à vapeur (Fig. 1).

Figure 1 : Évolution des portées d'interaction et trajectoires différenciées de certaines villes de l'économie-monde (1300-1800)



La figure retrace l'évolution du poids démographique de Venise, Lisbonne et Londres par rapport à l'ensemble du système des villes d'Europe, dans le plan des phases (en ordonnée, le poids de la ville dans le système à une date donnée et en abscisse, le poids qu'elle occupait à la date précédente). Ces trois villes se sont chacune spécialisées dans le commerce à longue distance, mais à des époques caractérisées par des portées d'échanges différentes (navigation à voile par cabotage, navigation à voile trans-atlantique, navigation à vapeur et chemin de fer). Les trajectoires des villes (déclin, retournement, croissance) reflètent ces évolutions.

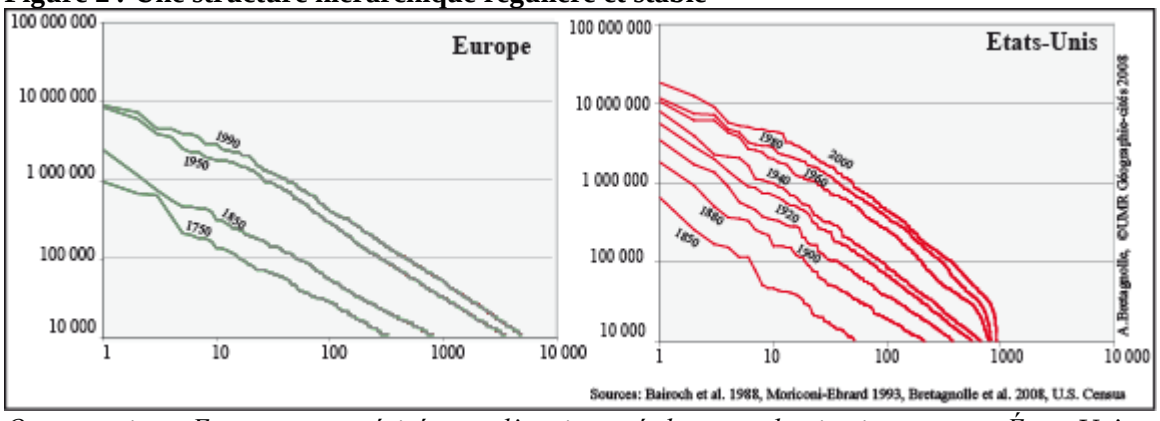
En conséquence, les systèmes de villes résultant de ces interactions multi-échelles ne sont généralement pas réductibles à une réalité territoriale simple. Seuls les réseaux d'échanges qui se déploient majoritairement à l'échelle nationale échappent à cette règle, car ils s'articulent autour de réseaux de transports techniques qui existent sur des durées de temps très longues (relais de poste, routes, rails). Leur stabilité est renforcée par les fonctions de contrôle politique et économique du territoire, qui se caractérisent aussi par des temporalités longues. En revanche, à l'échelon régional ou international, il est beaucoup plus difficile de délimiter spatialement et de suivre au cours du temps les ensembles de villes qui font réseau. L'utilisation d'outils développés dans le champ de la théorie des systèmes complexes permet de s'affranchir dans une certaine mesure de ces contraintes de délimitation, grâce à des méthodes traitant de systèmes ouverts, multi-scalaires et caractérisés par une dynamique d'auto-organisation. Le modèle multi-agents Simpop2 simule ainsi des réseaux d'échanges se déployant de manière concomitante à des échelles différentes (locale, régionale, nationale et internationale) et dont la portée évolue au cours du temps, en fonction des progrès dans les technologies de transport et de communication.

2) Des propriétés émergentes au niveau macrogéographique

Les systèmes de villes se caractérisent, comme d'autres systèmes complexes, par une dichotomie apparente entre le comportement des entités élémentaires, à l'échelle mésogéographique, et celui du système, à l'échelle macrogéographique. Par exemple, 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 déclins et dont la juxtaposition s'apparente à des oscillations sans ordre apparent (Bretagnolle *et al.* 2006). Ces nombreuses fluctuations locales ne s'expriment pourtant pas par des modifications de la structure du système, lequel se caractérise par un comportement relativement stable dans le temps et dans l'espace, correspondant à un ensemble de propriétés émergentes *:* la différenciation hiérarchique des tailles de villes (Fig. 2), l'arrangement spatial des villes compte tenu de leur taille (Fig. 3) et la différenciation fonctionnelle des villes (en termes de spécialisations économiques) sont susceptibles de se maintenir selon des durées beaucoup

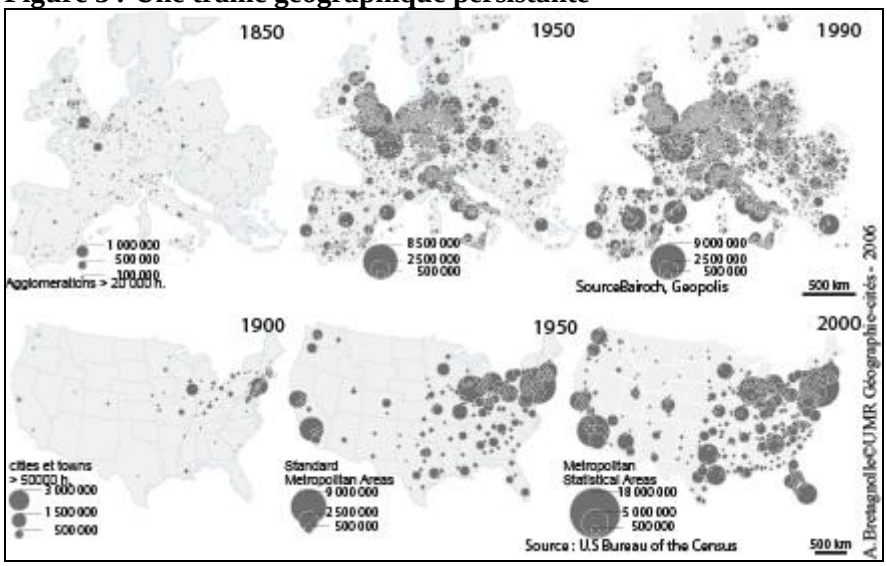
plus grandes que celles des individus qui les composent, et qui sont caractérisés par des changements de professions, des migrations ou par le renouvellement des générations (Pumain *et al.*, 2006-a).

Figure 2 *:* Une structure hiérarchique régulière et stable



Que ce soit en Europe, caractérisée par l'ancienneté de son urbanisation, ou aux États-Unis, dans lesquels la ville est apparue tardivement, les systèmes de villes ont une structure hiérarchique très semblable. Les distributions du nombre de villes en fonction de leur taille conservent la même forme au cours des deux derniers siècles, même si les écarts entre grandes et petites villes ont tendance à se creuser (la pente des distributions s'accroît régulièrement).

Figure 3 *:* Une trame géographique persistante



Les cartes montrent l'évolution de la population des villes (la surface des cercles est proportionnelle à la population) dans les systèmes stabilisés, soit à partir de 1900 seulement pour les États-Unis. Même si de nouvelles localisations urbaines continuent d'émerger au XX^e^ siècle dans ce pays neuf (à l'ouest puis au sud), la ressemblance entre les deux séries de cartes est frappante : au cours du temps, les villes croissent en moyenne de façon proportionnelle à leur taille, et les inégalités initiales ont tendance à persister sur des durées très longues.

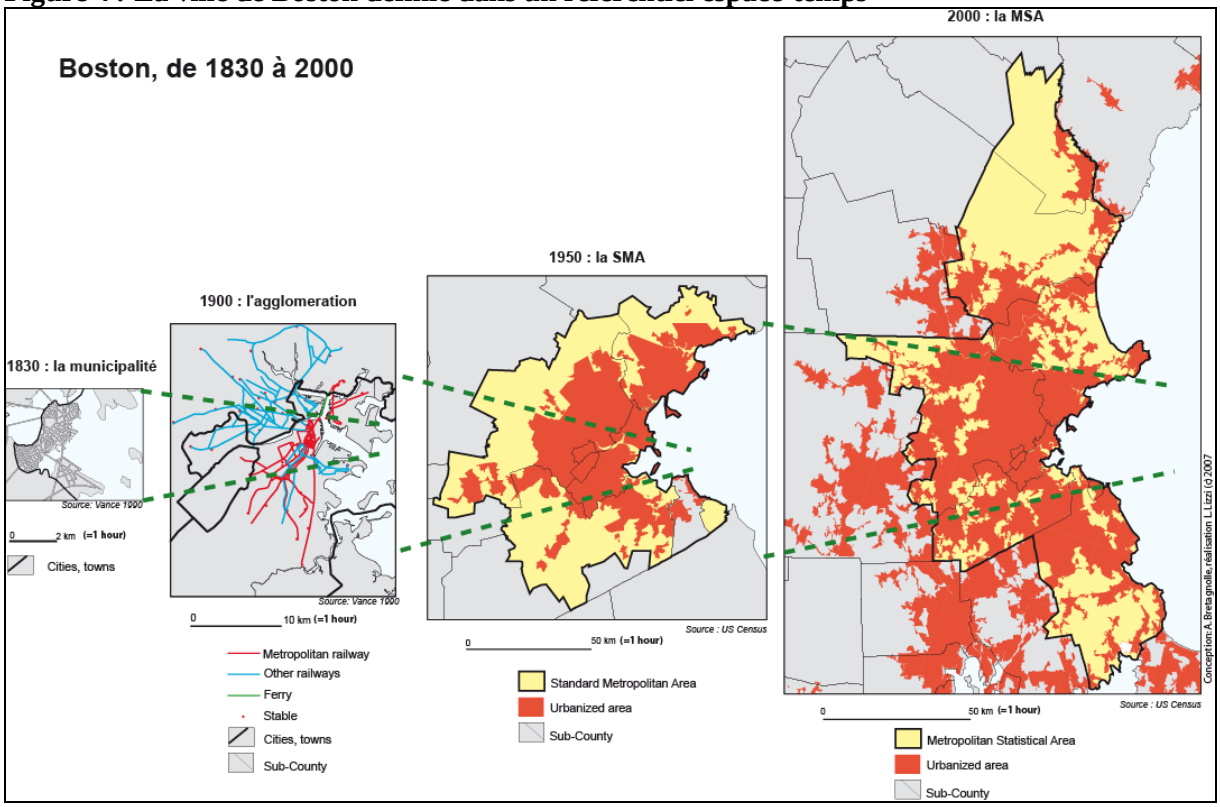
Cette structure se transforme néanmoins très lentement, notamment par un processus de diffusion hiérarchique des innovations et par des vagues de spécialisations fonctionnelles (Pumain *et al.* 2006-a). Ces processus sont essentiellement non linéaires *:* la croissance produit une concentration dans les grandes villes, en partie liée à des boucles de rétroaction 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 qui se succèdent le long d'un trajet 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.

3) Au niveau mésogéographique, la nécessaire prise en compte d'un référentiel espace-temps

L'interprétation des dynamiques observées à l'échelle macroscopique et dans le temps long ne peut se faire sans une délimitation cohérente des entités à l'échelle mésoscopique (celle de la ville), qui tienne compte de l'évolution de l'espace des interactions dans ces deux derniers siècles. La ville est une entité collective dotée d'une puissance de développement extrêmement forte depuis la révolution de l'industrie et des transports, dont on mesure les retombées à la fois sur le plan démographique et en termes de consommation d'espace *:* entre 1800 et 2000, la population urbaine maximale observée à l'échelle du monde a été multipliée par 30 et la surface des grandes villes par 100. L'utilisation de bases de données sur les villes mises à la disposition des chercheurs par les organismes de recensement peut conduire à des analyses erronées, en minorant la portée de l'extension des villes dans l'espace. Par exemple, la ville définie officiellement aux États-Unis jusqu'en 1950 est une simple municipalité politique (appelée *city* ou *town*, selon les États), réalité territoriale qui ignore le développement massif des banlieues à la fin du XIX^{e} siècle et sous-estime donc largement la croissance des plus grandes villes. Lorsque l'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), on restitue de manière plus cohérente la réalité du phénomène urbain dans le temps long (Fig. 4).

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



L'échelle de ces quatre cartes montrant l'évolution de l'extension spatiale de la ville de Boston dans les deux derniers siècles est établie en durée de déplacement et correspond approximativement au budget-temps moyen consacré par les ménages aux déplacements domicile-travail (une heure). La forte co-ïncidence temporelle entre le rayon de la ville, les technologies de transport et cette durée montre qu'on peut définir la ville à toute époque comme un objet socio-spatial construit par des interactions répétées contraintes par un invariant temporel, celui de la journée.

Pour mener à bien l'exploration comparée des systèmes de villes en Europe et aux États-Unis, nous avons accordé un soin particulier à la construction de bases de données harmonisées sur les populations urbaines. Pour les États-Unis, nous avons utilisé la totalité des recensements de population (un tous les 10 ans) et reconstruit, à chaque date, une délimitation spatiale appropriée des villes *:* de 1790 à 1870, les villes sont de simples municipalités, puis nous les définissons comme des agglomérations, en regroupant au moyen d'un critère de distance-temps d'une heure les municipalités localisées à portée d'une plus grande. À partir de 1940, nous utilisons la délimitation des aires fonctionnelles, fondée sur les navettes domicile-travail (Bretagnolle *et al.* 2008). Pour l'Europe, nous avons utilisé les bases de données définissant des agglomérations de plus de 10 000 habitants, construites par Paul Bairoch et ses collaborateurs (1988) et François Moriconi-Ebrard (1993) (Tableau 1).

Tableau 1 *:* Évolution du nombre de villes en Europe et aux États-Unis

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

Sources et bases de données : Europe : Bairoch et al. (1988), Pinol (2003), Moriconi-Ebrard (1994), Géographie-cités (2005) ;

États-Unis : Census of the U.S., Base U.S. Cities (Bretagnolle, Giraud : Harmonie-cités 2007).

II/ DU MODELE THEORIQUE AU MODELE GENERIQUE SIMPOP2

Le modèle théorique Simpop2 élaboré par l'équipe de Géographie-cités accorde un rôle essentiel aux interactions et à l'évolution de la position relative des villes dans les réseaux d'échange pour expliquer les dynamiques démographiques et fonctionnelles observées (Sanders *et al.* 2006). S'il met en avant le rôle des interactions socio-spatiales dans la dynamique du système, il 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 utilisons concernant la productivité ou la demande par habitant pour telle ou telle fonction urbaine sont estimés de manière rudimentaire, à partir des travaux d'historiens ou d'économistes (Maddison 2001, Mitchell 1992) et n'ont de valeur que dans la comparaison entre différentes simulations.

1) Les règles gouvernant la dynamique des villes

Dans le modèle Simpop2, la dynamique des villes résulte de trois processus. Le premier réside dans l'apparition de cycles d'innovations qui ont eu un rôle majeur dans la croissance urbaine, en d'autres termes ceux qui ont sélectionné spécifiquement un groupe particulier de villes en les spécialisant par rapport au reste du système urbain. Quatre cycles répondent à ces critères *:*

- Le grand commerce maritime et fluvial, au tournant des XII^{e}-XIII^{e} siècles, 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 XVII^{e} siècle.
- La première révolution industrielle, au début du XIX^{e} siècle, les villes concernées étant soit de petites localités monospécialisées des bassins miniers et sidérurgiques, soit des grandes villes capables de diversifier l'éventail de leurs fonctions.
- La révolution industrielle de l'électricité et de l'automobile, à la fin du XIX^{e} siècle, se caractérisant par des spécialisations urbaines dans la production pétrolière, la construction automobile ou les pneumatiques, les centrales hydro-électriques.
- La révolution des techniques de l'information, au milieu du XX^{e} siècle, 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 le tourisme.

Le deuxième processus gouvernant la dynamique des villes s'établit autour des règles d'acquisition et de diffusion des nouvelles fonctions. Celles-ci se répandent de manière hiérarchique à l'intérieur du système de villes *:* l'une des hypothèses clé du modèle est fondée sur la théorie de la diffusion spatiale des innovations, formulée par T. Hägerstrand (1952) et vérifiée maintes fois à propos des systèmes de villes, notamment par A. Pred (1973). 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 selon une simple 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. Dans notre modèle, la taille d'une ville, mesurée en population ou en richesse, est donc généralement un pré-requis dans les règles qui lui permettent éventuellement d'acquérir une nouvelle fonction. Cette règle peut être modulée par d'autres conditions, par exemple de localisation (pour les capitales d'État) ou de niveau fonctionnel antérieur (une ville ne peut acquérir une fonction centrale d'un niveau donné si elle ne possède pas déjà celle de niveau inférieur). La précocité d'adoption joue aussi un rôle, dans la mesure où le marché associé à une fonction donnée 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 perdra 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.

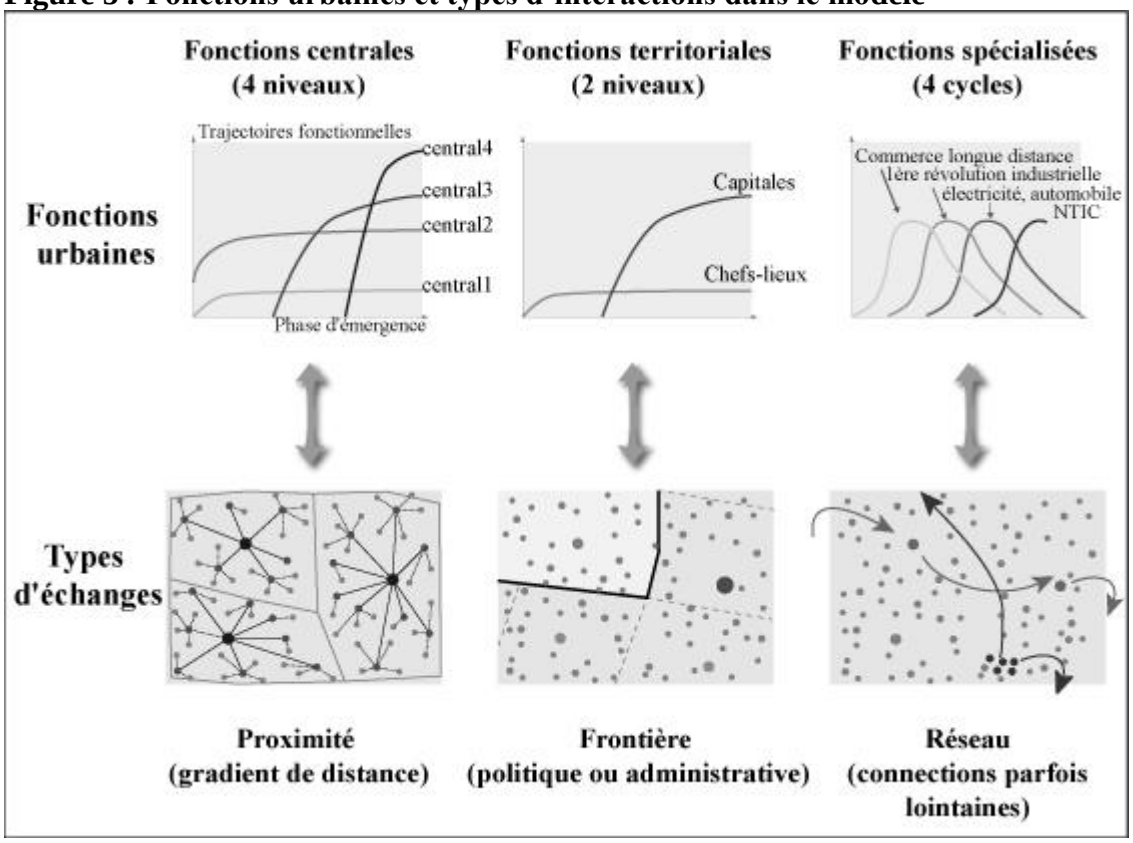
Enfin, un troisième processus décrit la modification de l'espace des échanges inter-urbains, sous l'effet des innovations dans les techniques de déplacement et de communication (Bretagnolle 2005). Pour chaque type et niveau de fonction, le modélisateur dispose d'un paramètre réglant la portée maximale des échanges, qu'il peut faire varier au cours du temps en fonction des données fournies par la documentation historique.

2) Les fonctions urbaines et les types d'interactions

Trois types de fonctions sont retenus dans le modèle (Fig. 5) *:*

- 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 sont soumises à 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 peu près 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 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 sont relativement stables (vers 1500 en Europe) ou lorsque les États sont institutionnellement constitués (vers 1800 aux États-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 spécialisation plus attractive, soit à la suite d'un tirage aléatoire (notamment si elle fait partie d'un gisement, houiller, métallurgique, pétrolier ou autre), soit en raison de sa richesse ou de sa spécialisation précédente.

Figure 5 : Fonctions urbaines et types d'interactions dans le modèle



Dans le modèle Simpop2, les fonctions urbaines sont réparties en trois types : les fonctions centrales (commerce et services à la population locale et environnante), les fonctions territoriales (capitales d'état ou chefs-lieux régionaux) et les fonctions spécialisées (nées des grands cycles d'innovation qui ont eu un rôle majeur dans la croissance urbaine). À chacune de ces trois catégories de fonctions sont associés des échanges fondés sur des spatialités spécifiques.

3) Le fonctionnement du marché d'échange

Parmi les 10 fonctions urbaines prises en compte dans le modèle, seules les fonctions centrales de niveau supérieur (2, 3 et 4) et les fonctions spécialisées sont associées à un marché d'échange. Chacune de ces fonctions est paramétrée par une productivité et une demande par habitant, qui évoluent dans le temps (pour plus de détails, on pourra se reporter au site http ://www.simpop.parisgeo.cnrs.fr). Rappelons que ces variables sont exogènes mais que les modalités choisies sont des ordres de grandeur plutôt que des valeurs précises (qu'il serait impossible de calculer avant le XIX^{e} siècle). Ces variables 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 définit la part d'actifs par fonction au moment où celle-ci apparaît dans une ville.

Le modèle fonctionne de manière synchrone et découpe le temps en itérations de 10 ans[2]. Au début de chaque itération, on calcule pour chaque ville et pour chaque fonction son offre (productivité par habitant multipliée par le nombre d'actifs dans cette fonction) et sa

[2] Le modèle informatique a été conçu par Benoît Glisse et Alexis Drogoul et implémenté par Benoît Glisse (Glisse 2007).

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 consommatrices *:* 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). Cette règle permet de tenir compte du caractère relativement sélectif de ces échanges.

Une fois que chaque ville productrice a constitué son réseau, un deuxième mécanisme intervient pour sélectionner les partenariats, c'est-à-dire les vendeurs et acheteurs qui vont effectivement 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 clients potentiels 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.

4) L'évaluation de la croissance démographique et économique des villes

À la fin de chaque itération, le nombre d'actifs dans chaque fonction, la population totale et la richesse totale de chaque ville sont réévalués. 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, pour une période donnée. Il s'agit de rendre compte de la tendance démographique conjoncturelle, qui peut être marquée par des crises (épidémies, guerres, récessions économiques) ou au contraire par des périodes de forte urbanisation (transition démographique, exode rural etc.). La part de croissance démographique que nous injectons dans le modèle est un paramètre qui peut évoluer dans le temps *:* plus elle est faible, plus la croissance générée en propre par le marché d'échanges est forte, ce qui se traduit par une plus grande différenciation des tailles de villes en raison des 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. Il 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 et qu'il reste des demandes insatisfaites de la part des villes 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 ce total est grand, plus vite la ville s'ajuste au résultat de l'échange. Cette vitesse de réaction est liée à la plus ou moins grande rapidité de l'information qui circule entre les villes et qui permet à des actifs de migrer rapidement vers telle ou telle localité attractive *;* nous la faisons varier en fonction des progrès qu'ont connus 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. À 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 démographique conjoncturelle.

III/ UN MODELE APPLIQUE AUX VILLES D'EUROPE (1300-2000)

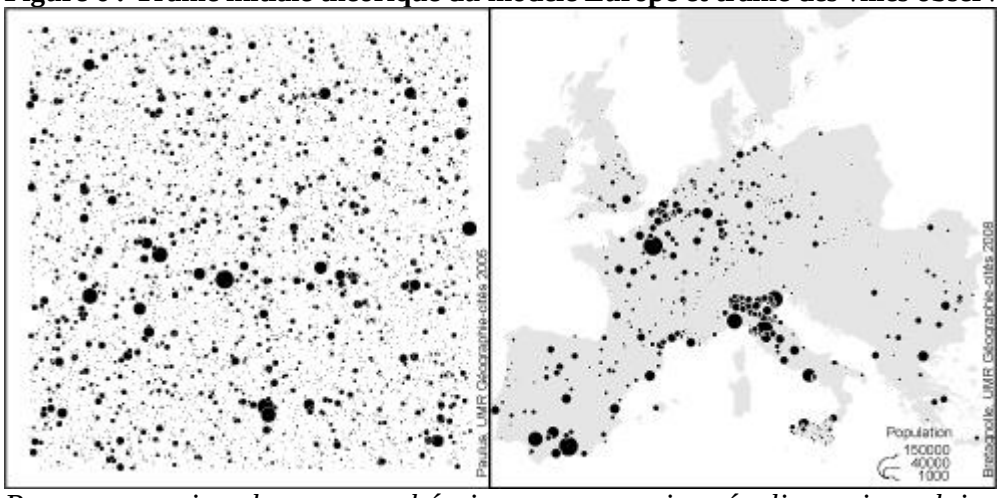
La période que nous avons retenue pour commencer les simulations, soit les XII^{e}-XIII^{e} siècles, correspond à la réactivation des circuits de l'échange inter-urbain à longue distance en Europe. À cette époque, les villes de la Hanse commercent par exemple avec celles de l'Italie du nord, par l'intermédiaire de relais établis en France (foires de Champagne) puis en Allemagne (grâce à l'ouverture de cols alpins). Le semis des villes est déjà assez dense, avec en moyenne une ville tous les 20 km, sauf dans les zones de forêt, de lande et de montagne. Une grande partie des localités existe déjà à l'époque gallo-romaine, à l'exception des nouvelles issues de fondations religieuses ou des grands défrichements des XII^{e}-XIII^{e} siècles, à l'ouest, des XV^{e}-XVI^{e} siècles à l'est. Selon les estimations de Paul Bairoch, on dénombre en 1300 170 villes de plus de 10 000 habitants parmi lesquelles cinq dépassent 100 000 habitants (Paris, Grenade, Venise, Gênes, Milan). L'ensemble de ces caractéristiques permet de construire la situation initiale du modèle.

1) Simulations théoriques

Afin d'établir les règles génériques gouvernant l'évolution des villes sans devoir tenir compte de la configuration géographique d'un territoire particulier, nous avons réalisé nos premières simulations à partir d'une situation initiale simplifiée, dans laquelle les localités sont réparties de manière aléatoire à l'intérieur d'un carré[3] (Fig. 6).

[3] La situation initiale théorique a été construite par Fabien Paulus (Université Louis Pasteur / UMR Image et Ville).

Figure 6 *:* Trame initiale théorique du modèle Europe et trame des villes observée en 1300



Pour construire la trame théorique, un semis régulier triangulaire (de type christallérien) a été généré dans un carré représentant 5 millions de km² et contenant 5000 villes (voir Tableau 1). Parmi celles-ci, 1000 sont activées dès 1300, et les autres sont choisies au cours des siècles suivants selon un tirage aléatoire. Pour affecter une population aux villes en 1300, le carré est divisé en 16 mailles de taille égale, et dans chacune, les villes reçoivent une population issue d'un tirage aléatoire dans une distribution lognormale dont les paramètres sont identiques à ceux calculés pour la distribution observée.

Les fonctions initiales données aux villes en 1300 sont les fonctions territoriales (chefs-lieux en 1300 à l'ouest et en 1500 à l'est, capitales en 1500), certaines fonctions centrales (de niveau 1 pour toutes les villes et de niveau 2 pour une partie des plus grandes, sélectionnées selon un tirage aléatoire), et la spécialisation grand commerce. Cette dernière fonction a été attribuée selon un aléa à des grandes villes situées en bordure sud et ouest du carré (représentant la Méditerranée et l'Atlantique) et dans une diagonale nord-ouest/sud-est (représentant les relais intermédiaires entre les villes de la Hanse et celles de l'Italie du nord). À partir de 1800, deux gisements industriels sont activés, dans la moitié nord du carré (à l'ouest *:* bassins miniers du Rhin et de la Ruhr, à l'est *:* bassin de la Silésie). À l'intérieur de ces gisements, une partie des villes reçoit la fonction industrielle, selon un tirage aléatoire effectué parmi les localités de petite taille et qui n'ont que la fonction central 1.

Nous avons utilisé un protocole de validation multi-échelles[4] (Sanders *et al.* 2007), examinant les sorties du modèle à l'échelle macrogéographique (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 mésogéographique (trajectoires de villes par groupes de taille ou de localisation, ou par fonction) et au niveau microgéographique (population de la plus grande ville à chaque époque, trajectoires des plus grandes villes, trajectoires de villes spécialisées). Le modèle reproduit de manière satisfaisante l'évolution de la population totale du système, en particulier lors de périodes de récession (la grande peste, au XIV^{e} siècle) ou au contraire d'expansion urbaine forte (révolution industrielle et transition urbaine du XIX^{e} siècle, que l'on arrive à simuler par une très forte augmentation des valeurs des paramètres de croissance liée au marché). La pente de la distribution rang-taille évolue de manière cohérente, et l'on obtient en 2000 la même valeur que pour la distribution observée (Tableau 2).

[4] Le protocole de cette validation multi-échelle ainsi que les macros SAS utilisées ont été élaborés par Hélène Mathian et Lena Sanders (CNRS, UMR Géographie-cités).

Tableau 2 *:* Évolution de la pente des distributions rang-taille des villes européennes (simulations théoriques)

	Observations		Simulations	
	Pente*	^{2}	Pente*	^{2}
800	0.69	.99	0.75	.98
850	0.77	.99	0.78	.98
950	0.91	.99	0.89	.98
000	0.94	.99	0.94	.98

** : il s'agit de la pente (en valeur absolue) de la droite d'ajustement des distributions rang-taille*

En revanche, la population des très grandes villes n'est pas bien ajustée par le modèle, alors même que le nombre total de villes dans la classe de taille la plus élevée est correct. Le tableau 3 montre que la population des plus grandes villes n'est bien simulée qu'à partir d'un certain rang (le deuxième en 1500, le cinquième en 1700 etc.). Par exemple, en 1500, la population de la plus grande ville est de 225 000 habitants (Paris), selon les observations et de 149 000 habitants selon les simulations, et cela malgré tous nos efforts lors du calibrage des paramètres. Cela signifie que les fonctions injectées dans le modèle ne suffisent pas pour générer de telles croissances, même lorsque la ville les possède toutes simultanément. Or, on peut constater que ces villes partagent une même caractéristique, quelle que soit la période considérée *:* dès le Moyen Âge, leur sphère d'influence dépasse largement le cadre européen, par exemple 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 puis capitale d'un empire colonial) ou plus tard Londres (tournée vers l'Inde et les Amériques). Les simulations théoriques suggèrent donc d'introduire une nouvelle fonction dans le modèle, que l'on pourrait appeler « ville-monde » au sens de Wallerstein ou de Braudel et qui caractériserait ce très petit nombre de villes fortement connectées avec l'extérieur du système (Bretagnolle dir. 2006, Pumain *et al.* 2006-b).

Tableau 3 *:* Population des plus grandes villes d'Europe, observées et simulées (modèle Europe théorique)

Dates	Observations*	Simulations*	Rang de la première ville correctement ajustée
1500	Paris, 225	149	2
1700	Londres, 575 Paris, 575 Naples, 500 Amsterdam, 200	193 189 182 162	5
1800	Londres, 948 Paris, 550 Naples, 430	254 243 239	4
1950	Londres, 8900 Paris, 6200 Ruhr, 4100 Berlin, 3500	2932 2865 2733 2439	5
2000	Paris, 10500 Londres, 9200	6995 6976	3

** population en milliers. Sources : Bairoch et al. 1988, Moriconi-Ebrard 1994.*

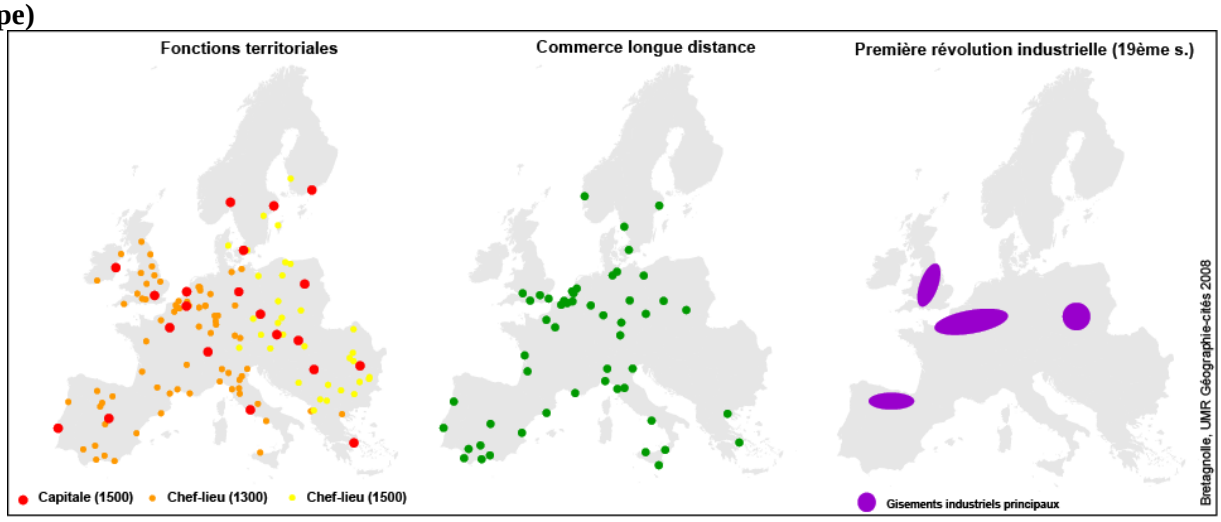
2) Simulations géo-référencées

Dans un deuxième temps, nous avons considéré en situation initiale les localisations réelles des villes en 1300, avec leur population et leurs fonctions historiques, afin de mieux comprendre, par la comparaison avec les simulations théoriques, le rôle des configurations géographiques et des contraintes liées aux héritages (*path dependence*, Arthur 1994, que nous proposons de traduire par *enchaînement historique*, cf. Pumain et al, 2006-c) dans l'évolution des villes. La situation en 1300 résulte en effet d'une histoire déjà contrastée (Fig. 6), qui se traduit par des oppositions entre des régions urbaines denses et très spécialisées (en Italie du nord, dans le nord-ouest de l'Europe, dans le sud de l'Espagne) et d'autres très rurales (notamment en Scandinavie, en Pologne et en Europe Centrale).

Un premier travail a consisté à compléter la base de Paul Bairoch, très lacunaire pour les petites villes puisque celle-ci ne contient qu'environ 350 villes en 1300 et 600 en 1500. Nous nous sommes fondés sur l'estimation selon laquelle il existe environ 1000 villes dépassant 2000 habitants en 1500 (Bardet, Dupaquier 1997, Pinol dir. 2003). Nous avons attribué dès 1300, à l'ouest, et 1500 à l'est, des populations de 1000 ou 2000 habitants à des villes qui apparaissent quelques siècles plus tard dans la base Bairoch.

L'attribution des fonctions en situation initiale s'est déroulée selon les mêmes mécanismes que pour les simulations théoriques (Fig. 7). Les capitales sont introduites à partir de 1500, période caractérisée par un regroupement de l'autorité dans des frontières nationales relativement stables, à l'exception de la Rhénanie où le morcellement territorial se poursuit. La fonction chef-lieu est attribuée à une centaine de villes selon un critère de taille (à l'ouest celles de plus de 10 000 habitants dès 1300, à l'est celles de plus de 5000 habitants en 1500). La spécialisation « grand commerce » est donnée à une cinquantaine de villes, identifiées à partir des sources historiques (Bairoch 1985 et 1997, Braudel 1979, Hohenberg et Lees 1992). Il s'agit de villes méditerranéennes qui commercent avec l'Orient et le Maghreb, de villes de la Ligue Hanséatique situées sur la façade atlantique et baltique et de relais intermédiaires, en France et en Allemagne. S'ajoutent à cette liste d'autres villes de l'Atlantique impliquées dans les circuits d'échanges internationaux (Portugal, France, Angleterre) ou certaines capitales européennes. Les spécialisations issues de la première révolution industrielle sont données, en partie, à de petites villes localisées au cœur des gisements miniers et métallurgiques (Midlands, bassin franco-belge, Galicie, Silésie, Ruhr).

Figure 7 *:* Les fonctions attribuées en situation initiale (simulations géo-référencées, Europe)



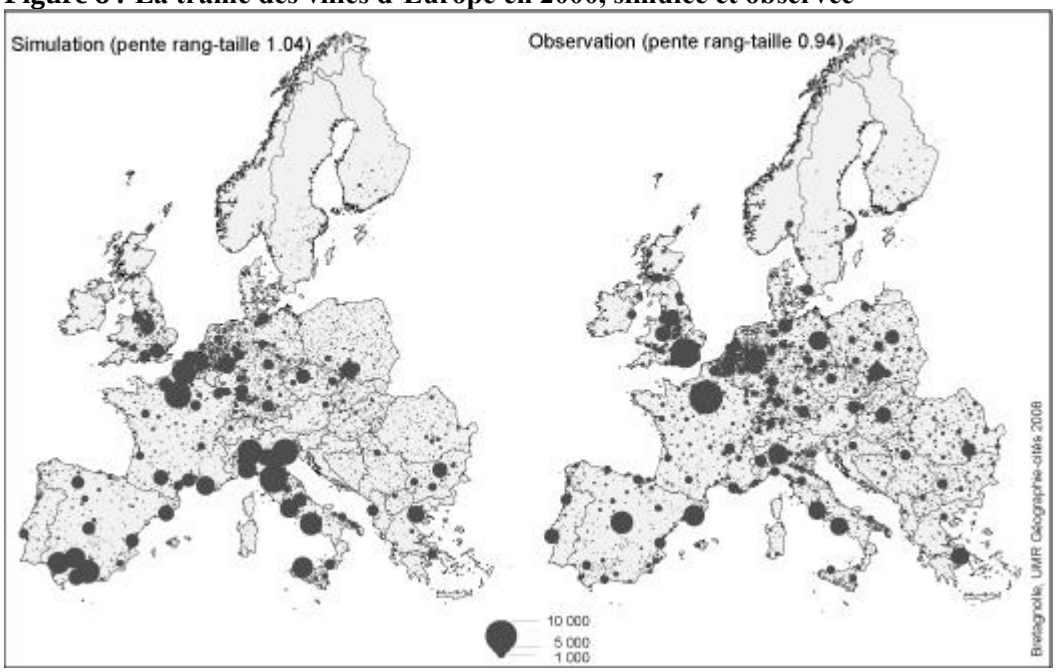
La situation initiale du modèle Europe prend en compte des configurations géographiques (contour des frontières de l'Europe, rôle des littoraux, des fleuves et des grands cols) et des héritages historiques (capitales nationales et régionales, avec pour ces dernières une activation plus tardive dans la moitié orientale, étapes du grand commerce révélant la force de réseaux urbains déjà très structurés en 1300). À l'époque de la révolution industrielle, la configuration géographique devient à nouveau très déterminante, avec la localisation des grands gisements houillers et métallurgiques.

Afin de tester le rôle de la situation initiale dans l'évolution des systèmes de villes, nous avons utilisé les mêmes paramètres dans les deux types de simulations, soit ceux calibrés à partir d'une situation initiale théorique. Les résultats montrent que la simulation géo-référencée sous-estime en 2000 la population totale (280 millions d'urbains en Europe au lieu des 335 millions simulés avec une situation initiale théorique). Dans le même temps, la distribution des tailles de villes est plus hiérarchisée (pente de 1.04). Les mécanismes de concurrence locale semblent donc plus intenses dans la simulation réelle que dans la simulation théorique. Comme l'illustre l'exemple des villes possédant la fonction Capitale (Fig. 8), on observe des croissances limitées par la proximité de villes voisines plus grandes, dans les zones densément urbanisées (Berlin, Vienne, Belgrade) et des déclins liés à un isolement par rapport aux circuits principaux de l'échange, dans les régions périphériques (Lisbonne, Stockholm, Athènes, Londres). Au total, seules deux capitales font partie des 20 plus grandes villes en 2000 (Paris et Rome). Au contraire, dans la simulation sur un semis

théorique, 13 capitales font partie des 20 premières villes en 2000, car ces villes ne sont pas en position de concurrence, l'espacement minimal entre chacune ayant été fixé à 500 km.

Un autre résultat concerne l'évolution de la trame européenne dans le temps long (Fig. 8). La simulation montre qu'à l'exception des zones industrielles, la croissance urbaine reste largement sous-estimée dans la moitié nord de l'Europe (sud de l'Angleterre, Scandinavie, Allemagne, Pologne). Au sud en revanche, les villes du sud de l'Espagne et du nord de l'Italie se maintiennent depuis le Moyen Age au sommet de la hiérarchie. Le basculement du centre de gravité de l'Europe, du sud vers le nord (Braudel 1979), n'est pas correctement restitué par la simulation, qui accorde trop de poids aux héritages historiques. Ce résultat nous invite à repenser cette évolution historique majeure dans le cadre de la modélisation, et à nous interroger sur les règles qui doivent être introduites pour simuler correctement le déclin relatif des vastes régions urbaines du sud de l'Europe.

Figure 8 : La trame des villes d'Europe en 2000, simulée et observée



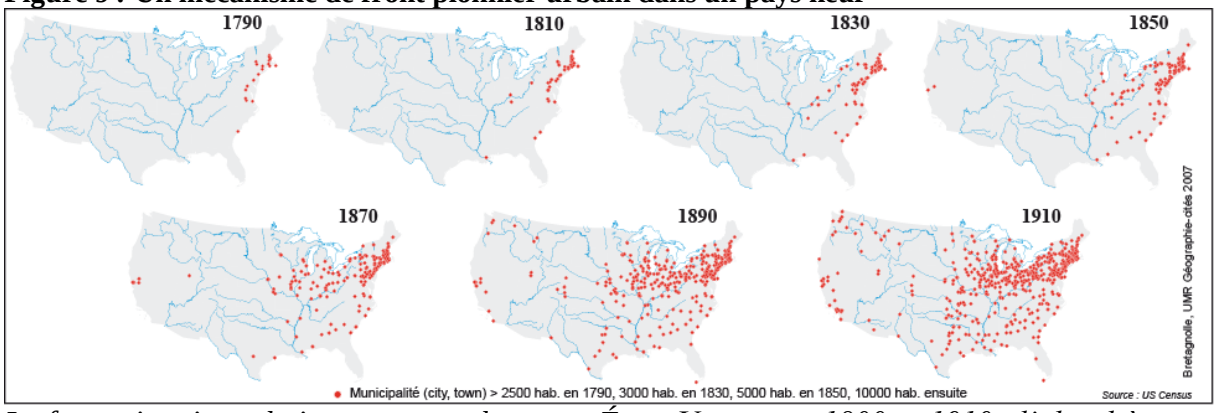
Cette figure met en évidence la sous-estimation du rôle de l'espace géographique dans les simulations, effectuées avec les paramètres du modèle théorique de l'Europe. La croissance est trop faible dans les périphéries nord et est de l'Europe (en particulier pour la moitié nord qui s'impose pourtant historiquement à partir des XV^e^ et XVI^e^ siècles). Au sud, les villes méditerranéennes ont une avance initiale qui compense leur position excentrée par rapport aux réseaux d'échanges. En outre, les contrastes de taille sont mal restitués à l'intérieur de certaines frontières nationales (France, Espagne).

Enfin, une dernière observation met en évidence le rôle des frontières nationales dans l'évolution des villes européennes. On constate, sur la figure 8, que 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. Or, la situation initiale et les règles du modèle ne tiennent pas compte des modes de gouvernance propres aux différents pays. Le modèle met ainsi en évidence la force des processus de structuration qui sous-tendent l'évolution du système des villes européennes dans le cadre des territoires nationaux.

IV/ CONSTRUCTION D'UN MODELE ÉTATS-UNIS, EN CONTREPOINT DU MODELE EUROPE

Le système des villes américaines est très différent de celui dépeint pour l'Europe et appartient à un deuxième type de systèmes, celui des pays neufs. Les États-Unis se caractérisent ainsi par un peuplement urbain récent qui s'organise en vagues successives, ce qui a nécessité la création d'un mécanisme de front pionnier urbain pour la mise en place des villes dans le modèle (Fig. 9).

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



Le front pionnier urbain se met en place aux États-Unis entre 1800 et 1910, d'abord à l'est puis à l'ouest. Dans le modèle, les quelques villes qui apparaissent entre 1650 et 1790 sont activées selon leur ordre d'apparition historique. Ensuite, le front urbain est géré par trois paramètres : le nombre de villes activées à chaque date, la largeur de la bande territoriale concernée par le tirage aléatoire et la localisation du point le plus extrême, vers l'ouest pour le premier front pionnier, vers l'est pour le second.

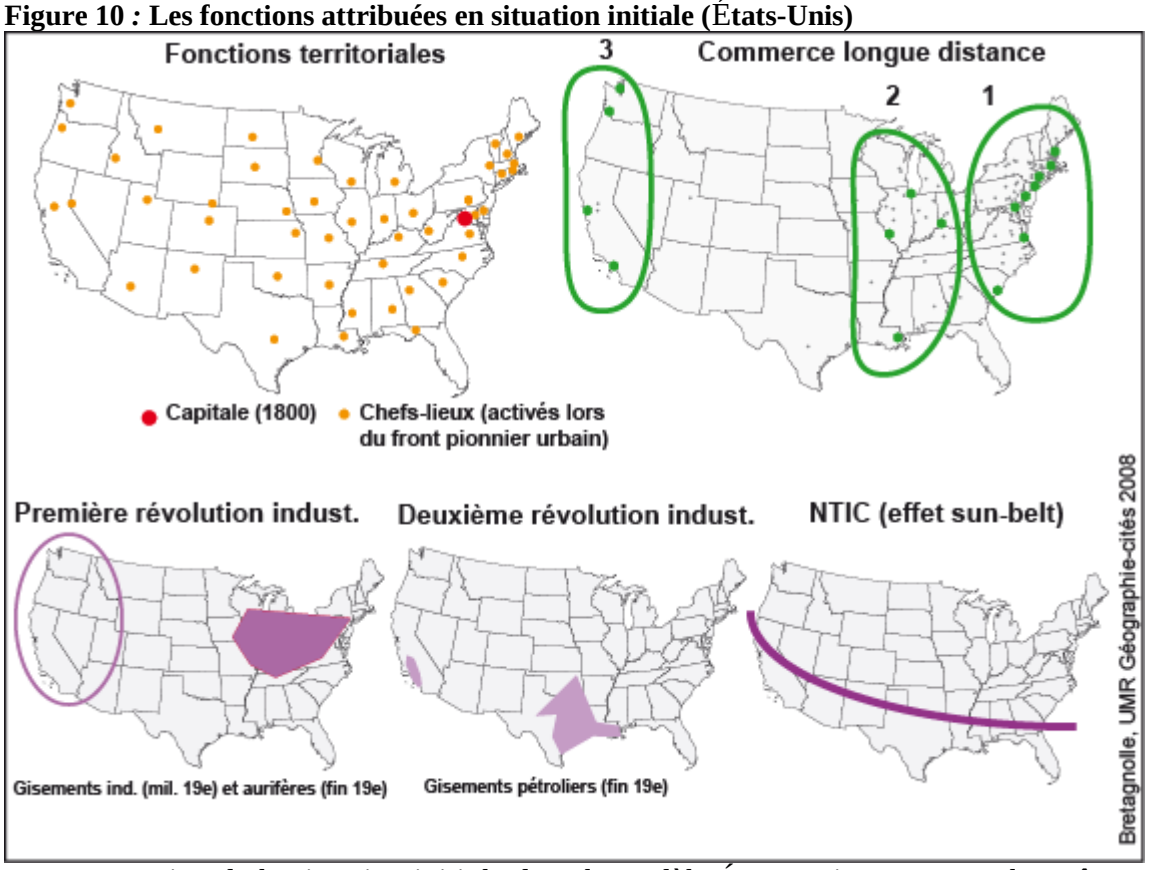
En outre, la trame urbaine des États-Unis est différente de celle de l'Europe. Les contrastes hiérarchiques sont plus intenses, notamment en raison du nombre plus réduit de petites villes, créées plus récemment : au delà du Mississippi, la plupart des localités urbaines sont nées ou se sont développées avec le chemin de fer, ce qui leur a permis d'emblée de desservir un territoire beaucoup plus vaste qu'en Europe à l'époque médiévale, où les moyens de transport étaient plus lents et de plus faible capacité. A l'ouest, le semis urbain très lâche s'explique aussi par la présence de vastes zones désertiques et montagneuses.

1) Situation initiale et mécanisme de front pionnier urbain

Les fonctions attribuées aux villes en situation initiale sont de même type que dans le modèle Europe. Toutes les villes reçoivent la fonction Central 1 et seule une partie des plus grandes, choisies au hasard, bénéficient d'une fonction centrale de niveau supérieur. L'attribution des fonctions territoriales s'articule sur le mécanisme de front pionnier[5] : les capitales de chaque état reçoivent cette fonction lors de leur activation, alors que la capitale fédérale émerge en 1800 (Fig. 10).

[5] Le mécanisme de front pionnier a été implémenté par Thomas Louail (IBISC, Université d'Evry).

Figure 10 : Les fonctions attribuées en situation initiale (États-Unis)



La construction de la situation initiale dans le modèle États-Unis repose sur les mêmes principes que pour le modèle Europe, à deux différences près. Tout d'abord, elle tient compte de la diffusion progressive des villes dans le territoire américain : les chefs-lieux sont activés tour à tour selon le mécanisme de front pionnier, et les villes du grand commerce apparaissent en trois phases, au cours du XIX^e^ siècle. Ensuite, les gisements associés aux cycles d'innovation sont plus nombreux qu'en Europe. En effet, dans le vieux continent, les gisements pétroliers sont très succincts et l'effet sunbelt n'a pas donné lieu à des croissances aussi marquées qu'aux États-Unis.

La spécialisation « grand commerce » est attribuée selon trois vagues : la première décrit les grands ports de l'Atlantique (à partir de 1740) ; la deuxième (1810-1850) est représentée par des ports maritimes ou fluviaux, dynamisés par le commerce des esclaves (Baltimore, Nouvelle-Orléans) et l'agriculture industrielle (Cincinnati, Saint-Louis, Chicago) ; enfin, la troisième vague est constituée par les grands ports de la façade Pacifique, qui émergent en tant que tels à partir des années 1860 (Seattle, San Francisco, Portland, Los Angeles) (Pred 1973, Vance 1995). À partir de 1830, une partie des villes situées dans le polygone s'étirant de la région des Grands Lacs au littoral Atlantique reçoivent la fonction industrielle. Une deuxième vague est constituée à l'ouest par des villes situées près de gisements d'or ou autres métaux (Chudacoff 1981, Pred 1966). Entre 1890 et 1950, certaines villes localisées dans les gisements pétroliers du sud et de l'ouest sont tirées au sort pour recevoir une spécialisation correspondant à la deuxième révolution industrielle (Ghorra-Gobin 1997, Chudacoff 1981). Enfin, à partir de 1940, un polygone parcourant le sud des États-Unis permet d'identifier les villes tirées au sort pour recevoir la fonction Cycle 4 (activités liées aux NTIC, attirées en partie par l'effet *sunbelt*) (Ghorra-Gobin 1998, Pred 1977, Scott 2004).

Dans un premier temps, nous avons appliqué à cette situation initiale les paramètres calibrés pour l'Europe théorique. Même si les résultats ont été extrêmement médiocres, leur analyse a permis d'établir une liste des différences fondamentales entre les deux types de systèmes de villes. Tout d'abord, nous avons constaté une forte sous-estimation de la

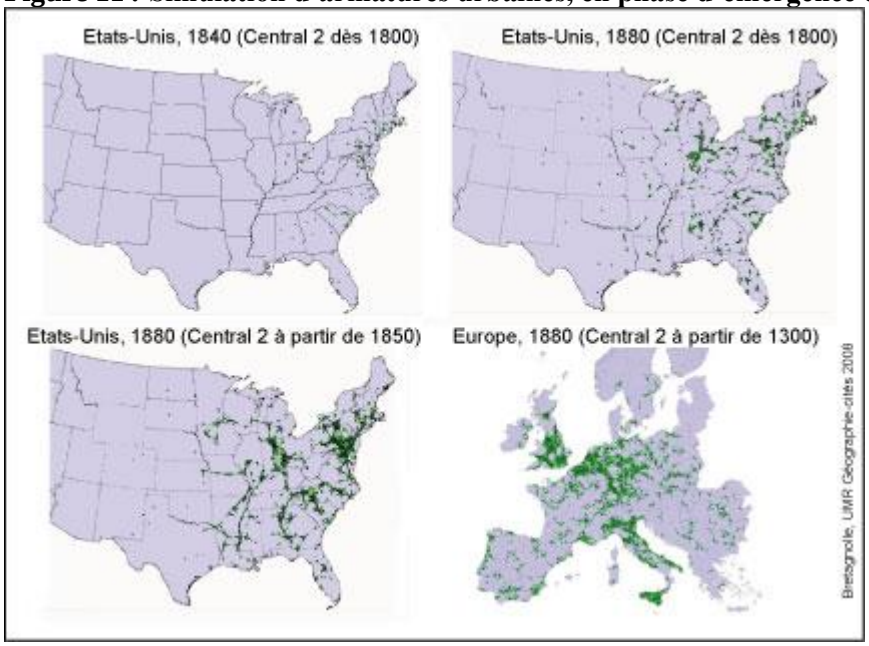
population totale des villes américaines, dès le début du XIX^{e} siècle, due en grande partie aux mécanismes du marché *:* les parts d'actifs déclinent dans chaque fonction, centrale ou spécialisée, et cela pour la grande majorité des villes. On observe en outre que la population reste majoritairement concentrée dans les villes de l'est, celles de l'ouest et du sud n'arrivant pas à croître. Enfin, les grandes métropoles régionales (mêmes celles de l'est) sont caractérisées par des croissances bien plus faibles que celles observées historiquement. Procédant de manière chronologique, en commençant par la période pré-industrielle, nous avons modifié les règles issues du modèle Europe à partir d'un diagnostic des insuffisances dans les résultats des simulations. Au final, quatre nouvelles règles ont été introduites pour obtenir des simulations satisfaisantes. Ces règles résument, en quelque sorte, les spécificités fondamentales du système des villes américaines par rapport à celui de l'Europe.

2) Identification des règles spécifiques pour les États-Unis

Les simulations réalisées à partir des paramètres calibrés pour l'Europe mettent en évidence la faiblesse des villes créées par le mécanisme de front pionnier, trop petites pour pouvoir adopter des fonctions centrales de niveau régional ou des fonctions spécialisées. Elles s'affaiblissent 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. Les « villes de la frontière » (Wade 1959) sont caractérisées par le fait qu'elles apparaissent avant même que le sol environnant ne soit travaillé pour le rendre exploitable. Elles émergent comme des avant-postes commerciaux à partir desquels le peuplement irradie *:* leur croissance permet d'écouler les récoltes plus facilement, ce qui augmente la valeur de la terre. À son tour, l'expansion de la frontière agricole dynamise la croissance de ces nœuds d'échange. Un nouveau mécanisme a donc été introduit dans le modèle et donne (au moyen d'un paramètre) une croissance démographique conjoncturelle plus forte pour les villes situées en avant des fronts pionniers, afin de stimuler leur croissance et leur permettre d'accéder à des fonctions de niveau supérieur.

À l'arrière des fronts pionniers, les villes acquérant des fonctions centrales de niveau régional (central 2 et central 3) sont également caractérisées par des pertes importantes dans la première moitié du XIX^{e} siècle. L'analyse des simulations montre que leur déclin résulte notamment d'un stock important de produits invendus, en raison du manque de villes clientes dans la portée de l'époque. Cette portée atteint 100 kilomètres dans les années 1830-1840, grâce au réseau ferroviaire et aux bateaux à vapeur circulant le long des fleuves ou des canaux. Elle est cependant insuffisante pour permettre aux villes, encore en très petit nombre, de desservir l'ensemble du territoire colonisé, qui s'étend jusqu'au Mississipi (Fig. 11). En conséquence, les fonctions centrales de niveau 2 et 3 ont été introduites plus tard qu'en Europe, en 1850 pour Central2 et en 1870 pour Central3. Ce fonctionnement est différent de celui qui existe en Europe *:* alors que dans cette dernière une partie des villes fondent leur développement initial sur un commerce essentiellement local et régional (Hohenberg, Lee, 1992), les simulations suggèrent que ce sont essentiellement des fonctions spécialisées qui fondent la croissance des villes américaines jusqu'en 1850-1870.

Figure 11 *:* Simulation d'armatures urbaines, en phase d'émergence du système urbain.



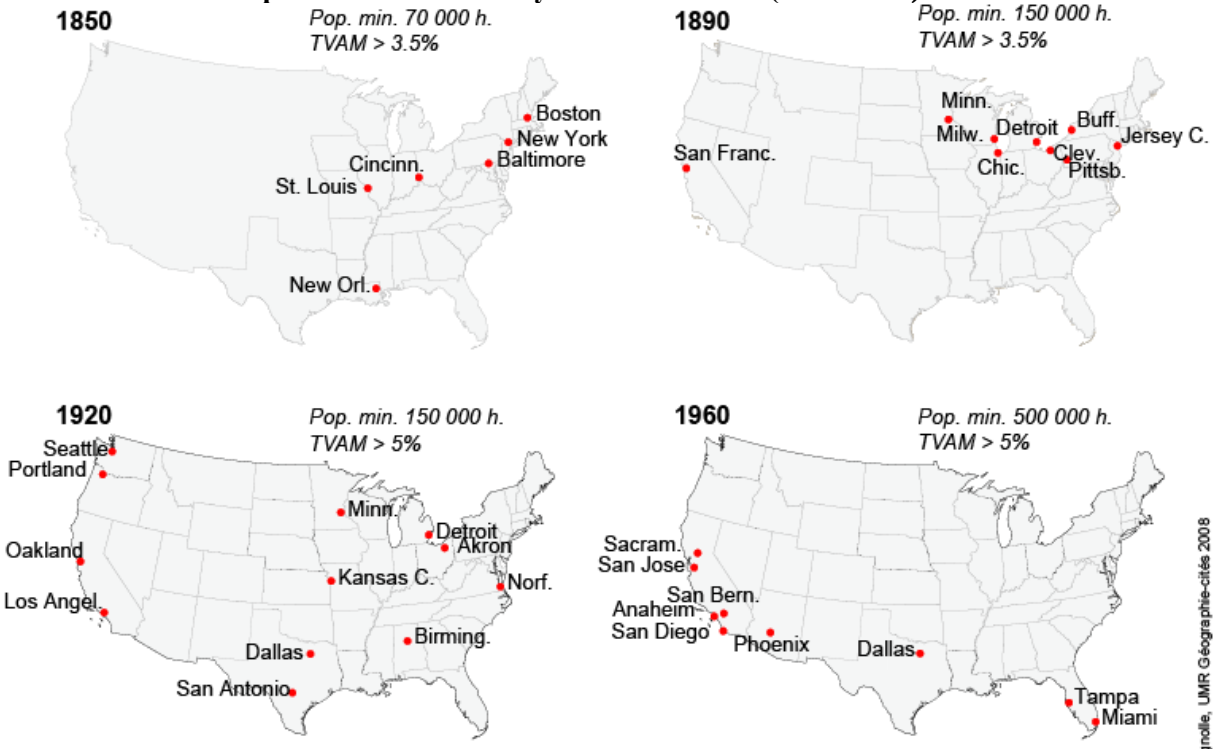
Avec des valeurs de paramètres observées historiquement : étendue du territoire occupé par les villes (le front pionnier urbain s'étend sur 2000 km), nombre total de villes (77 selon le recensement) et portée associée à ce type d'échange (une centaine de km, grâce aux canaux à vapeur et aux premières lignes de train, encore rares en Europe à cette époque), l'armature urbaine simulée en 1840 (en haut à gauche) ou en 1880 (en haut à droite) n'est pas très réaliste. Les villes Central 2 ont trop peu de villes clientes dans leur portée pour que leur production soit écoulée, et les réseaux sont peu étoffés. Cette fonction a donc été introduite plus tard que dans le modèle Europe, et avec une portée plus grande, ce qui produit des réseaux plus vraisemblables (en bas à gauche), dessinant des formes comparables à celles obtenues en Europe à la même date (en bas à droite).

Pour des raisons qui ne tiennent pas au remplissage de l'espace par les villes, les simulations montrent que les fonctions spécialisées souffrent aussi d'un manque de localités clientes pour écouler leur production dans la première moitié du XIX^e^ siècle. On compte à cette époque une dizaine de villes-ports, réparties sur la côte atlantique, et autant de villes localisées dans leur hinterland. Le marché intérieur est largement insuffisant pour soutenir la croissance forte des villes du grand commerce. Le modèle met cette fois en avant une autre caractéristique des États-Unis à cette époque, à savoir le poids extrêmement fort des échanges avec l'extérieur du système dans sa phase d'émergence. Tout au long du XVIII^e^ siècle et de la première moitié du XIX^e^ siècle, les ports de l'Atlantique exportent vers l'Europe des fourrures, des céréales, du poisson ou du bois. Ce lien fort avec l'international se maintient ensuite, avec les villes du golfe du Mexique et les ports du Mississippi (Caraïbes, Canada), puis les villes de la côte ouest, largement tournées vers l'Asie. Afin de tenir compte de cette impulsion donnée par l'environnement international, un nouveau paramètre a été introduit dans le modèle États-Unis. Ce dernier fixe la quantité de demande supplémentaire nécessaire pour que la fonction Grand commerce se développe correctement, et accorde en retour les gains financiers suscités par ces ventes. Le même diagnostic ayant été réalisé pour les cycles d'innovation suivants, celles-ci ont été soutenues par le même mécanisme *:* une demande internationale a été injectée pour permettre de générer les croissances exceptionnelles des villes spécialisées dans les différents cycles.

Si cette prise en compte de l'environnement international permet de générer, pour chaque fonction, les croissances exceptionnelles associées aux innovations, la répartition de cette croissance dans l'espace ne coïncide pas avec les observations historiques. Une autre caractéristique des villes américaines est en effet la corrélation très étroite qui existe entre chaque cycle d'innovation, les gisements qui lui sont associés et la croissance extrêmement

brutale de nouvelles métropoles régionales (Fig. 12). Afin de générer ces croissances fortement concentrées dans l'espace, une impulsion initiale a été donnée tour à tour aux gisements associés à chaque innovation. Grâce à un paramètre, une partie de la demande adressée aux fonctions spécialisées est spécifiquement dédiée aux villes localisées sur ces gisements lors de la mise en place du nouveau cycle.

Figure 12 : Vagues de croissance urbaines (observées) mettant en évidence l'émergence brutale de nouvelles métropoles associées à des cycles d'innovation (États-Unis)



N-B: le taux de variation annuel moyen (TVAM) est calculé sur les 20 années précédant la date de la carte

Sources: Base de données U.S. Cities (Bretagnolle, Giraud, Harmonie-cités 2007)

Les déplacements successifs de la croissance urbaine dans l'espace américain ont conduit à ajouter un paramètre particulier dans le modèle États-Unis, caractéristique des systèmes urbains des pays neufs où le territoire se construit au fur et à mesure que les villes aux fonctions spécialisées se développent. L'analyse des taux de croissance observés des villes a permis d'identifier quatre périodes, correspondant chacune à un cycle d'innovation particulier. Pour chaque période, sont représentées les plus grandes métropoles du moment dont la croissance dépasse le seuil, très élevé pour des villes de cette taille, de 3,5% puis 5% par an pendant plusieurs décennies. L'émergence de ces nouvelles métropoles s'explique par l'exploitation de gisements associés aux innovations du moment : le grand commerce atlantique et fluvial (Mississipi), la première révolution industrielle (région des grands lacs) et la ruée vers l'or (San Francisco), les gisements pétroliers californiens et texans et les villes de l'industrie automobile (Détroit, Akron), les états de l'ouest et du sud profitant de l'effet sunbelt.

À l'aide de ces nouvelles règles, les simulations permettent d'obtenir des résultats globalement satisfaisants, au niveau macrogéographique (tableau 4), régional et microgéographique (Fig. 13). Le modèle est néanmoins moins performant à partir de 1970 : la population totale est sous-estimée tandis que la croissance des grandes villes est trop forte (tableau 4). Les règles de diffusion hiérarchique des innovations ne semblent plus adaptées au contexte urbain qui caractérise les États-Unis à partir des années 1970-1980, et qui ont été bien mises en évidence dans la littérature sous l'expression de « *counter-urbanization* » (Berry 1976). Les résultats de la simulation permettent d'en proposer une interprétation

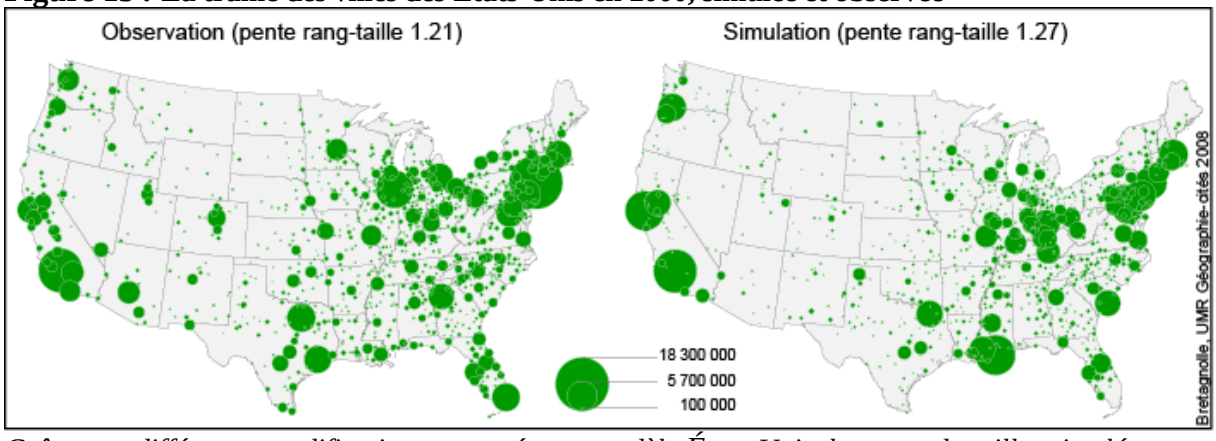
originale *:* si la *sunbelt* capte, comme en Europe, une partie de la croissance liée aux NTIC, le semis urbain n'y est pas aussi saturé. De vastes réserves foncières sont encore inexploitées et constituent des niches potentielles pour de nouvelles localisations, en d'autres termes pour de simples bourgades qui vont expérimenter à leur tour l'explosion brutale qu'ont connue les métropoles régionales des cycles précédents.

Tableau 4 *:* Population urbaine totale et pente des distributions rang-taille des villes aux États-Unis

	Observations			Simulations		
	Population totale	Pente*	^{2}	Population totale	Pente*	^{2}
1890	17 361 632	0.94	.99	14 297 079	0.83	.99
1920	43 791 461	1.06	.99	39 324 567	1.02	.98
1950	102 998 977	1.15	.98	77 690 542	1.12	.98
1980	189 574 006	1.22	.96	143 895 418	1.25	.99
2000	261 739 386	1.21	.97	219 801 194	1.32	.98

** : il s'agit de la pente (en valeur absolue) de la droite d'ajustement des distributions rang-taille*
Sources : Census of the U.S., Base U.S. Cities (Bretagnolle, Giraud : Harmonie-cités 2007).

Figure 13 *:* La trame des villes des États-Unis en 2000, simulée et observée



Grâce aux différentes modifications apportées au modèle États-Unis, la trame des villes simulée en 2000 ressemble assez bien à la trame observée : les croissances urbaines associées aux nouveaux gisements sont nettes (peut-être même trop : voir le cas de New York, sous-estimée par rapport aux villes californiennes, ou La Nouvelle-Orléans, qui prend nettement le pas sur Chicago alors qu'elles ont émergé toutes deux à la faveur du grand commerce). Les contrastes entre les tailles des villes sont néanmoins trop forts en 2000, car les règles du modèle n'intègrent pas la « contre-urbanisation », qui s'est caractérisée dans les années 1970-1980 par un déclin relatif des grandes villes.

Conclusion

Le modèle Simpop2 est conçu pour simuler l'émergence de deux propriétés fondamentales des systèmes de villes *:* leur *différenciation hiérarchique*, qui se renforce au cours du temps, avec notamment une très forte accentuation des inégalités de poids des villes au moment de la transition urbaine (première révolution industrielle dans les pays industrialisés) et leur *diversification fonctionnelle*, liée à chacun des grands cycles

d'innovation techniques et économiques qui se traduisent par l'apparition de nouvelles fonctions urbaines. La nouveauté, par rapport à d'autres modèles générateurs des hiérarchies urbaines (Pumain, 2006-b), vient de ce que cette forme d'auto-organisation n'est plus représentée comme le résultat d'un processus statistique de croissance entre des entités homogènes et indépendantes, mais comme une construction progressive fondée sur une variété d'interactions spatialisées entre des entités hétérogènes en co-évolution. Le processus d'émergence ainsi modélisé est celui des *propriétés structurelles* du système. L'émergence des transformations sociales qui sous-tendent cette émergence structurelle, sous la forme d'innovations politiques, culturelles, technologiques ou politiques, est injectée dans le modèle sous forme de paramètres ou de règles exogènes, activés à différents moments du processus. (Aucun modèle actuellement ne permet de simuler ce type d'émergence correspondant à la créativité sociétale historique). Le modèle ainsi construit est donc à la fois *générique*, parce qu'il simule l'émergence de propriétés universelles, communes à tous les systèmes de villes, et *historique*, au sens où il ne fonctionne de manière satisfaisante que si on lui injecte un nombre limité de paramètres exogènes qui traduisent l'évolution sociale des conditions de la vie urbaine. Cette « mise en contexte » est une caractéristique nécessaire, propre à un modèle de sciences sociales, par rapport à des modèles mathématiques ou physiques plus généraux et abstraits.

Le modèle multi-agents Simpop2 apporte aussi une méthode originale pour comparer différents types de systèmes de villes dans le monde. L'application du modèle à l'évolution des villes en Europe et aux États-Unis a permis, non seulement, de vérifier que les propriétés émergentes communes étaient correctement simulées, mais aussi de *hiérarchiser et mesurer* un certain nombre de différences qui étaient jusque là perçues de manière qualitative, notamment celles qui relèvent de la forme de l'occupation de l'espace par les villes. On a pu constater ainsi qu'aux États-Unis, la coïncidence temporelle entre la mise en place du système d'échanges inter-urbains et la révolution des transports, qui permet d'emblée des portées spatiales quatre fois plus grandes que celles caractérisant la trame urbaine européenne dans la phase d'émergence du système, donne aux *fonctions spécialisées* un rôle moteur dans la croissance urbaine. Alors que les villes européennes ont émergé dans leur grande majorité dès le Moyen-Age comme des lieux centraux (marchés agricoles, centres politiques et administratifs) fondés sur des relations de proximité, les villes américaines ont d'abord été, au XIX^{e} siècle puis dans la première moitié du XX^{e} siècle des villes spécialisées dont le développement est assuré par leur position dans des réseaux de longue portée. 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 vers l'ensemble des régions d'un pays qui est alors de même taille que l'Europe entière, et vers l'international. Une deuxième caractéristique des villes américaines, 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 des différentes régions à l'intérieur du pays. Cette réactivité très forte de la main-d'œuvre, qui a été mise en évidence dans la littérature, 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 est liée à la taille et à la diversité géographique du pays, qui permet une *très forte spécialisation économique* des villes associées à des effets de gisement de ressources localisées. Ces villes peuvent se permettre dans un premier temps d'être fortement monospécialisées, car elles trouvent d'emblée, grâce aux systèmes de transport, des débouchés nombreux. Elles peuvent ensuite diversifier leur production et devenir concurrentielles dans d'autres secteurs d'activité.

Il reste à déterminer si ces propriétés, mises en évidence pour les États-Unis, sont partagées par l'ensemble des pays neufs, dans lesquels les réseaux de villes sont apparus à

l'époque des transports rapides. Des simulations en cours[6] sur l'évolution du système des villes en Afrique du Sud devraient bientôt nous permettre d'apporter un début de réponse à cette question.

Bibliographie

Bairoch P. (1985), *De Jericho à Mexico, villes et économie dans l'histoire*. Paris : Gallimard.

Bairoch P. (1997), *Victoires et déboires : histoire économique et sociale du monde du XVI^e^ siècle à nos jours*, Paris : Gallimard.

Bairoch P., Batou J., Chèvre P. (1988), *La population des villes européennes. Banque de données et analyse sommaire des résultats: 800-1850*, Genève : Librairie Droz.

Bardet J.-P., Dupaquier J. (1997), *Histoire des populations de l'Europe. 1 – Des origines aux prémices de la révolution démographique*, Paris : Fayard.

Braudel F. (1979), *Civilisation matérielle, Economie et capitalisme, XV^e^ – XVIII^e^ siècles* (tomes 1, 2 et 3), Paris : A. Colin.

Berry B. 1976, « The Counterurbanization Process : Urban America Since 1970 », in Berry B. ed. *Urbanization and Counter-Urbanization*, Beverly Hills, London : Sage Publications, vol. 11.

Bretagnolle A., 2005, « Les villes dans l'espace-temps : vitesse des communications et structuration des territoires », in Volvey ed., *Echelles et temporalités*, Paris : Editions Atlande, 180-187.

Bretagnolle A. dir., Denise Pumain, Benoît Glisse, Céline Vacchiani-Marcuzzo 2006, *Émergence et évolution des systèmes urbains : un modèle de simulation en fonction des conditions historiques de l'interaction spatiale*. Collaborateurs : Alexis Drogoul, Thomas Louail, Hélène Mathian, Fabien Paulus, Lena Sanders. Rapport final de l'ACI Systèmes Complexes en SHS, juin, 65 pages, Paris, UMR Géographie-cités.

Bretagnolle A., Glisse B., Louail T., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C. 2007, « Deux types de systèmes de villes identifiés par la modélisation multi-agents ». Colloque de Cerisy-La-Salle Systèmes Complexes en SHS, 26 mai-2 juin.

Bretagnolle A., Daudé E.., Pumain D., 2006, « From theory to modelling : urban systems as complex systems », *Cybergeo* 335, 26 p.

Bretagnolle A., Giraud T., Mathian H., 2008, « La mesure de l'urbanisation des États-Unis, des premiers comptoirs coloniaux aux Metropolitan Areas (1790-2000) », *Cybergeo* (à paraître).

Bretagnolle A., Pumain D., Vacchiani-Marcuzzo C., 2007, « Les formes des systèmes de villes dans le monde », in Pumain D., Mattéi M.-F. ed., *Données Urbaines*, tome 5, Paris : Economica, 301-314.

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., Smith J. (1981), *The evolution of American Urban Society*, Upper Saddle River, New Jersey : Pearson Education, Prentice Hall.

Ferber J. (1995), *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*, Paris: InterEditions.

Ghorra-Gobin C. (1998), *La ville américaine, Espace et société*, Paris : Nathan Université.

Hägerstrand T. (1952), *The propagation of innovation waves*, Lund : The Royal University of Lund.

[6] Ce programme est dirigé par Céline Vacchiani-Marcuzzo (Université de Reims-EA Habiter, Laboratoire Géographie-Cités (UMR 8504).

Glisse B. 2007, *Exploration scientifique par la conception collaborative de systèmes multi-agents*, Doctorat de 3ème cycle sous la direction d'Alexis Drogoul, Laboratoire d'Informatique de Paris 6.
Hohenberg P. M., Lees L. H. (1992), *La formation de l'Europe urbaine, 1000-1950*, Paris : PUF.
Maddison A. (2001), *L'économie mondiale: une perspective millénaire*. Études du Centre de Développement, Paris : OCDE.
Mitchell B. R. (1992), *International Historical Statistics, Europe 1750-1988*, Basingstoke : Macmillan.
Moriconi-Ebrard F. (1994), *Géopolis, Pour comparer les villes du monde*, Paris :Anthropos.
Pinol J.-L. dir. (2003), *Histoire de l'Europe Urbaine*, Paris : Seuil.
Pred, A. (1966), *The Spatial Dynamics of U.S. Urban Industrial Growth, 1800-1914*, Cambridge (Mass.) : Harvard University Press.
Pred A. (1973), *Urban growth and the circulation of information : the United States system of cities, 1790-1840*, Cambridge (Mass.) : Harvard University Press.
Pred A. (1977), *City systems in advanced economies*, London : Hutchinson.
Pumain D., 2006, «Systèmes de villes et niveaux d'organisation», in Bourgine P., Lesne A. ed, *Morphogenèse. L'origine des formes*, Paris : Belin, 239-263.
Pumain D., Paulus F., Vacchiani-Marcuzzo C., Lobo J., 2006-a, « An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws », *Cybergeo*, 343.
Pumain D., Bretagnolle A., Glisse B., 2006-b, « Modelling the future of cities », *Proceedings of the European Conference on Complex Systems* (ECCS'06, Oxford).
Sanders L., 2006, « Les modèles agents en géographie urbaine », in Amblard, Phan eds., *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Paris : Hermes, 173-189.
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, 287-305.
Sanders L., Favaro J.-M., Glisse B., Mathian H., Pumain D., 2007, « Artificial intelligence and collective agents : the EUROSIM model », *Cybergeo, 392*.
Vance J. E. (1995), *The North American Railroad: its Origin, Evolution, and Geography*, John Hopkins University Press.
Wade R. C. (1959), *The Urban Frontier, 1790-1830*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.