Les modèles agent en géographie urbaine

Lena Sanders

▶ **To cite this version:**

Lena Sanders. Les modèles agent en géographie urbaine. Amblard F., Phan D. Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société, Hermes-Lavoisier, pp.151-168, 2006. halshs-00119088

HAL Id: halshs-00119088
https://shs.hal.science/halshs-00119088

Submitted on 7 Dec 2006

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.

Les modèles agent en géographie urbaine

Lena Sanders

7.1. Introduction

Les thématiques urbaines sont nombreuses et le fil choisi dans ce chapitre est donc plutôt d'ordre méthodologique, avec le but de donner, à partir de plusieurs études de cas relatives aux villes et aux systèmes de villes, un aperçu des différents types de modèles qui sont utilisés en géographie humaine pour simuler l'évolution des systèmes socio-spatiaux. L'accent sera mis sur des aspects comparatifs, afin de rendre compte des débats d'ordre méthodologique qui mobilisent les modélisateurs de cette communauté. Afin de simplifier les comparaisons, la plupart des exemples concernent des questions de localisation et de dynamique de populations, questions appréhendées à différents niveaux, de la mobilité des individus à l'évolution des dimensions d'un système urbain.

7.2. Objets et objectifs de la modélisation urbaine

La question des échelles tient une place importante dans de nombreux questionnements en géographie, où l'on s'intéresse explicitement à l'emboîtement ou à l'interférence de phénomènes opérant à différentes échelles. Il s'avère donc encore plus nécessaire qu'ailleurs, dans une démarche de modélisation, de préciser les niveaux d'observation et de modélisation des phénomènes étudiés. D'un point de vue thématique, on peut distinguer les travaux dont l'objectif est de mieux comprendre les dynamiques en jeu dans les espaces urbains et métropolitains (perspective intra-urbaine) et ceux qui portent sur l'évolution des systèmes de villes (perspective interurbaine). Dans le premier cas on s'intéresse aux mécanismes qui conduisent à l'émergence d'une certaine forme d'organisation spatiale dans l'espace urbain, qu'il s'agisse de l'apparition d'une discontinuité, traduisant un phénomène de ségrégation par exemple, du renforcement ou de la dilution d'une organisation centre-périphérie, ou encore de la mise en place d'une organisation polycentrique dans un espace fortement

centralisé (comme l'Ile-de-France). Dans le second cas, on s'intéresse à l'évolution de la configuration spatiale d'un système de villes, en cherchant à comprendre pourquoi certains nœuds se renforcent aux dépens d'autres, pourquoi la dynamique de croissance profite à certains ensembles de villes à certaines périodes, puis à d'autres dans d'autres contextes historiques et économiques. Ou encore, on cherche à identifier les processus sous-jacents à l'émergence d'un type d'organisation hiérarchique.

Que la problématique soit d'ordre intra ou interurbain, on peut ensuite distinguer trois niveaux clés d'un point de vue méthodologique:

- le niveau *micro-géographique* qui correspond aux individus, aux ménages, aux entreprises, qui peuvent être décrits par des caractères quantitatifs (âge, revenu, chiffre d'affaires..) ou qualitatifs (genre, catégorie sociale, secteur d'activité..). Relativement au questionnement évoqué plus haut, il s'agit de formaliser le processus qui conduit un individu à la décision de quitter son lieu de résidence, et qui l'amène ensuite à choisir tel nouveau lieu de résidence plutôt que tel autre etc.

- le niveau *meso-géographique* qui peut être représenté par les quartiers (dans le cas d'une perspective intra-urbaine) ou par les villes (dans le cas d'une perspective interurbaine), ou encore, plus généralement par tout type d'entité géographique qui a du sens relativement à la question posée (îlot, pôle d'emploi, région..). Les descripteurs correspondent alors soit à une forme d'agrégation des observations du niveau inférieur (nombre d'habitants, revenu moyen, profil social..), soit à une variable intrinsèquement méso-géographique (superficie, niveau fonctionnel, spécialisation, image..). Il s'agit à ce niveau d'identifier et de formaliser les mécanismes qui sont à l'origine d'évolutions différenciées de ces entités géographiques.

- le niveau *macro-géographique* est celui de la ville (perspective intra-urbaine) ou du système de villes (perspective interurbaine). Les descripteurs correspondent également à plusieurs origines possibles : différentes formes d'agrégation soit directement à partir du niveau micro-géographique (nombre d'habitants etc.), soit à partir du niveau méso-géographique (nombre de villes, taille moyenne..), ou intrinsèquement macro-géographique (densité, espacements, degré de concentration, organisation rang-taille..).

Certaines problématiques induisent a priori un certain niveau de formalisation, mais ce n'est pas toujours le cas. Ainsi, dans un questionnement relatif à la régularité de la distribution des tailles des villes d'un pays, régularité caractérisée par la loi rang-taille[1], deux positionnements sont possibles :

[1] Si on représente les villes d'un pays en fonction de leur nombre d'habitants et de leur rang sur un schéma bi-logarithmique, on obtient le plus souvent une courbe se rapprochant d'une droite de pente 1. Les vérifications empiriques de cette loi sont nombreuses, dans le temps comme dans l'espace, et ont donné lieu à une importante littérature (par exemple [M0R 93] pour une comparaison des différents pays du monde, [PUM 00] et [GUE 93] pour l'évolution

- juger qu'il est possible d'identifier et de théoriser des règles qui opèrent au niveau des interactions entre les villes, celles-ci étant alors considérées comme des entités collectives élémentaires, indivisibles ([ALL 79], [BUR 96], [BAT 01]);

- estimer utile d'appréhender les comportements au niveau individuel, et de modéliser explicitement les choix de localisation et de relocalisation des individus [BAT 01].

Dans les deux cas les chercheurs se sont placés dans le cadre des théories de l'auto-organisation, stipulant que cette structure quasi-universelle et durable que l'on observe à un niveau de description macroscopique, a émergé à partir du jeu d'interactions entre des éléments de niveau inférieur. Dans le premier cas ce niveau inférieur est celui de villages et de villes considérées comme entités élémentaires, et l'hypothèse est que la structure rang-taille émerge d'un ensemble d'interactions exprimant des relations de complémentarité et de concurrence propres à de telles entités, indépendamment des choix des individus résidant en ces lieux (modèle SimPop dont les principes sont résumés dans le §7.4.1 ci-dessous, [BUR 96]). Dans le second cas, ce niveau inférieur est celui des individus. Batty [BAT 01] simule ainsi les comportements d'agents se déplaçant sur une grille à la recherche de ressources. Ces agents sont capables de mémoriser les emplacements découverts, d'identifier le chemin pour y retourner, et de repérer les traces laissées par d'autres agents. Il montre comment émergent sur le temps long, à partir de ces mécanismes d'apprentissage, une structure polycentrique et hiérarchisée de l'habitat ainsi qu'un réseau structuré de routes. Cet exemple illustre comment, avec une même problématique - expliquer l'organisation rang-taille des villes-, un même champ conceptuel - les théories de l'émergence - et un même formalisme - les systèmes multi-agents -, des chercheurs choisissent de développer des modèles correspondant à des niveaux élémentaires très différents en fonction de leurs hypothèses et de leur philosophie de modélisation.

Dans un même ordre d'idées, le choix d'un certain formalisme n'implique pas non plus de modéliser le phénomène étudié à un niveau déterminé. S'il est vrai qu'en géographie, comme dans les autres sciences humaines et sociales, l'essor des modèles agents a favorisé le développement de très nombreux modèles formalisés au niveau des individus, il faut se garder de conclure que l'adoption de ce formalisme impose ce choix. Le formalisme multi-agents offre de nouvelles potentialités pour modéliser le fonctionnement d'entités collectives comme les villes tout autant que pour modéliser des règles de comportements individuels.

Par ailleurs, certains auteurs opposent les travaux fondés sur le niveau individuel qui correspondraient à une approche dite « nouvelle », et les modèles classiques qui opèreraient, eux, à un niveau agrégé, et qui seraient aujourd'hui obsolètes [BEN 04].

---

de cette loi sur le temps long en France, [BAT 01] pour caractériser l'évolution du système urbain britannique durant le 20e s., etc).

Cette distinction est peu fructueuse. D'une part le débat entre modélisation individu-centrée et modélisation agrégée est lui-même très ancien [Chapitres 5 et 6], et d'autre part dans le domaine des sciences sociales, les premiers modèles de microsimulation étaient développés déjà dans les années 1960 [ORC 57]. Développés au niveau des individus, ces modèles ont représenté à l'époque une fantastique innovation. Les formulations d'alors sont, assez naturellement, dépassées aujourd'hui, mais leur philosophie reste présente dans les modèles de microsimulation actuels qui en sont issus.

Parallèlement à la réflexion sur le niveau de modélisation, il s'agit de préciser quel est l'objectif du modèle développé : reproduire un « fait stylisé » ou reproduire un phénomène observé (figure 7.1) :

- Dans un cas on cherche à identifier un ensemble de règles très simples au niveau des entités de niveau élémentaire et de leurs interactions, qui aboutisse à la formation de structures observables et durables au niveau d'organisation supérieur. Le modèle de ce type le plus connu est celui de Schelling[2], dont les mécanismes sont très souvent repris pour simuler la formation de ségrégations spatiales dans l'espace intraurbain [Chapitre 17]. Il existe de très nombreux modèles développés dans un esprit similaire pour simuler les effets des comportements des individus à d'autres niveaux d'observation. L'idée est qu'il suffit de la répétition de mécanismes très simples pour produire des structures organisées et relativement complexes, sans qu'il n'y ait jamais eu intention de les créer. Ce type de modèle est beaucoup plus rare pour formaliser le comportement d'entités élémentaires qui seraient des entités géographiques, alors que les modèles agents permettent, là également, de constituer des mondes artificiels permettant des explorations riches d'un point de vue heuristique.

- Dans le cas où l'objectif est de reproduire le plus précisément possible la réalité observée, il s'agit de formaliser l'ensemble des règles et d'estimer les valeurs des paramètres qui permettent de reproduire les dynamiques observées. La confrontation avec les observations empiriques devient une étape essentielle. Alors que dans le cas précédent on souhaite simplement reproduire une forme globale cohérente (existence d'un gradient centre-périphérie par exemple), il s'agit ici de reproduire non seulement la forme du phénomène étudié mais également son inscription spatiale précise (gradient nord-sud à partir d'une centre localisé en tel point…).

---

[2] Le principe de base est le suivant : deux catégories de population co-existent et sont réparties sur une grille de type automate cellulaire. A chaque étape chaque individu peut changer de localisation s'il se sent insatisfait de son voisinage. Chaque catégorie d'individus à une légère préférence pour un voisinage où il ne serait pas minoritaire, ou très légèrement minoritaire seulement. Partant d'une distribution initiale aléatoire, cette légère préférence contribue à faire émerger, à terme, une configuration fortement ségrégée du peuplement [SCH 71], [Chapitre 17].

Cette double distinction, reposant d'une part sur le niveau de modélisation (individu/entité collective) et d'autre part sur l'objectif de la simulation d'un point de vue méthodologique (fait stylisé/réalité observée), permet de contsruire une typologie très simplifiée des applications des modèles agents dans le domaine urbain, et dans la suite, des exemples seront présentés pour chaque cas (figure 7.1).

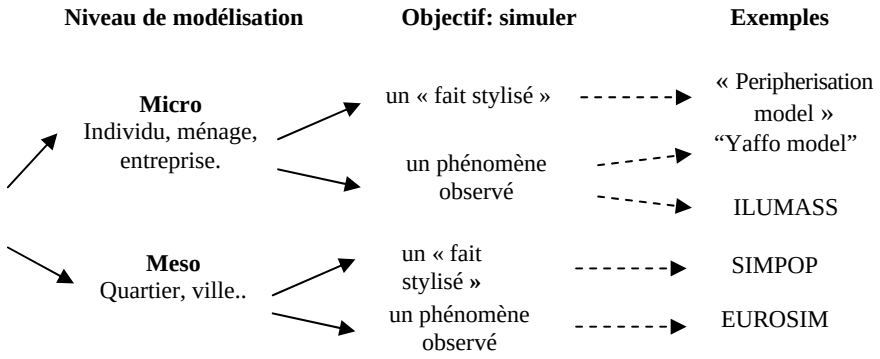

Figure 7.1. Caractérisation de quatre types de modèles agents suivant le niveau de modélisation et l'objectif du modèle

7.3. Approches individus-centrées en modélisation urbaine : microsimulation et modèles agents

Considérer qu'il est important d'appréhender les comportements individuels pour comprendre les organisations spatiales et que la diversité de ces comportements est motrice dans les transformations de ces organisations sont des idées anciennes. Dans son modèle de diffusion spatiale des innovations Hägerstrand [HÄG 53] cherchait à identifier la logique de comportement des acteurs (les adoptants potentiels). Il partait de l'idée que les actions et les événements repérables au niveau d'un acteur donné étaient influencés par les caractéristiques individuelles de celui-ci, par le contexte environnemental, et par les actions des autres acteurs [Chapitre 16]. Plus tard, dans le cadre conceptuel de la *time-geography* [HÄG 70] explicite la base de son approche, saisir les interactions entre des acteurs individuels qui ont des intentions, des devoirs, qui élaborent des projets, et qui subissent des contraintes dans un contexte spatio-temporel. Ce cadre conceptuel, qui exprime une philosophie proche de celle qui sous-tend les systèmes multi-agents (SMA), a notamment inspiré les géographes qui développent des modèles de microsimulation ([HOL 04], [MOE 02], [SPI 00]). Ce courant est cependant resté relativement marginal dans la modélisation urbaine : peut-être parce qu'il a fallu du temps avant que les modélisateurs de ces domaines parviennent clairement à expliciter la dimension spatiale de ces modèles, et que par ailleurs les premiers grands modèles n'intégraient justement pas les intentions des

individus ni les interactions entre eux[3]. Par ailleurs il a fallu attendre que l'outil informatique évolue suffisamment pour permettre d'implémenter et de faire tourner des modèles très gourmands en mémoire [Chapitre 6]. Et quand ces moyens informatiques ont été suffisamment performants, ce sont surtout les modèles reposant sur les SMA qui ont très rapidement diffusé dans le monde de la modélisation urbaine. La grande majorité d'entre eux concernent des faits stylisés (on reproduit un monde artificiel aux dimensions réduites), alors que la microsimulation vise le plus souvent la reproduction de faits observés, en grandeur nature, afin d'utiliser ensuite le modèle pour tester l'impact de différentes mesures politiques par exemple. Trois exemples sont présentés dans la suite, correspondant respectivement à un SMA pour reproduire un fait stylisé, le processus de périphérisation des villes d'Amérique Latine, un modèle de microsimulation pour étudier l'impact des choix résidentiels sur la pollution dans l'agglomération de Dortmund, et un modèle couplant automates cellulaires (AC) et SMA pour étudier un processus de ségrégation spatiale dans la ville de Yaffo dans l'agglomération de Tel Aviv. Dans les trois cas, l'accent est mis sur la façon de formaliser les choix individuels en matière résidentielle.

7.3.1. Un fait stylisé, le processus de périphérisation des villes d'Amérique Latine

Le modèle développé par [BAR 03] comporte trois catégories d'agents correspondant à différents niveaux de revenus (pauvres, classes moyennes, riches). Tous partagent les mêmes préférences en matière résidentielle, et recherchent une bonne accessibilité relativement aux services et aux emplois. Lors de chaque étape, les agents à la recherche d'une résidence circulent sur une grille et s'installent sur une cellule appropriée en fonction de ces préférences et des disponibilités. Si à une des étapes suivantes un agent de catégorie plus aisée choisit cette même cellule, le plus pauvre est évincé et doit rechercher un nouvel emplacement. En revanche, si un agent a pu rester en place durant *k* étapes, cette localisation devient pérenne. La répétition de ce mécanisme simple permet de générer une distribution spatiale de la population conforme à ce que l'on peut observer dans de nombreuses villes d'Amérique Latine et qui résulte du processus de périphérisation. Un habitat spontané se forme sur les marges de l'agglomération où se concentrent la population à faibles revenus, ces espaces sont ensuite intégrés dans l'agglomération au cours de l'extension urbaine et ils changent alors de composition sociale alors que de nouveaux habitats spontanés émergent plus loin. L'auteur utilise des mesures de fragmentation fondées sur la distribution rang-taille des agrégats de peuplement (considérés comme des « fragments ») afin de caractériser la morphologie urbaine à un niveau macro-géographique, et ainsi disposer

[3] Il n'est pas anodin que les modélisateurs de ce courant utilisent aujourd'hui des adjectifs qui leur permettent de se démarquer des modèles classiques du domaine, microsimulation *spatiale* pour [HOL 04], microsimulation *avancée* pour [MOE 02].

d'un indicateur permettant d'évaluer la ressemblance entre la structure simulée et la structure observée dans différentes villes latino-américaines.

7.3.2. Un modèle de micro-simulation avancée

Bien que développés au niveau des individus également, l'esprit des modèles de micro-simulation est très différent, notamment quant à la place accordée aux données. Dans certains pays, les chercheurs ont accès à une information relativement complète au niveau des individus, tant en termes de descripteurs démographiques, économiques et sociaux qu'en termes de localisation (lieu de résidence, lieu de travail). [HOL 04] utilisent ainsi une base de données contenant plus d'une centaine de descripteurs décrivant chacun des neuf millions de suédois de 1960 à 1995, pour développer leur modèle SVERIGE[4]. La situation initiale des simulations correspond ainsi à une *situation observée*.

Dans la plupart des cas les chercheurs ne disposent pas d'une telle information. Certains jugent cependant l'enjeu scientifique suffisamment important pour construire une population artificielle à partir des informations statistiques disponibles au niveau des entités administratives. L'équipe de Wegener [MOE 02] a ainsi construit une base d'information en grandeur réelle pour l'agglomération de Dortmund, avec des données sur les individus, les ménages, les logements, les lieux de travail et les modes de transport utilisés. Ces entités artificielles sont construites à partir de méthodes de désagrégation reposant sur des tirages aléatoires réalisés de manière à ce que les profils des populations artificielles obtenus soient les mêmes que les profils observés au niveau agrégé des 246 zones statistiques composant Dortmund [SPI 00]. La grille spatiale utilisée pour localiser les ménages, entreprises et immeubles est de 200 000 cellules et correspond à un niveau de résolution de 100m.

Le modèle ILUMASS[5] est construit de façon modulaire. Une vingtaine de modules correspondant à des phénomènes différents mais inter-reliés sont couplés. Les temporalités en jeu vont de l'année (construction d'immeubles, mobilité résidentielle, cycle familial par exemple) à la journée (mobilité quotidienne des individus, pollution par exemple). Chacun de ces modules rend compte d'un processus de choix et de décision de la part de chaque individu. Dans les modules les plus simplifiés le changement est formalisé à partir de simples transitions d'un état à un autre (un célibataire qui se marie par exemple) suivant une certaine

---

[4] SVERIGE (*System for Visualizing Economic and Regional influences Governing the Environment*) est un modèle de microsimulation permettant de tester des scénarios relatifs à des questions socio-démo-économiques variées sur l'évolution de l'ensemble de la population suédoise.

[5] ILUMASS (*Integrated Land-Use Modelling And Transportation System Simulation*) est le nom d'un projet consistant à intégrer des modèles relatifs à l'évolution de l'occupation du sol et du transport urbain [MOE 02].

probabilité. Dans d'autres, le processus de choix de l'individu est représenté. Ainsi, dans le module de choix résidentiel, les ménages choisissent un logement en fonction de l'attractivité pondérée de sa localisation et de ses caractéristiques propres, et de son prix relativement aux revenus du ménage. Un des objectifs du modèle est de tester différents scénarios relativement à la politique de transports urbains. Les impacts en matière de pollution sont calculés à partir des déplacements et des choix de modes de transport des individus.

7.3.3. Un modèle agent de ségrégation résidentielle

Le modèle développé par [BEN 02] a pour objectif de mettre en évidence les mécanismes à l'origine de la ségrégation spatiale entre populations juives, arabo-chrétiennes et arabo-musulmanes dans le quartier de Yaffo à Tel Aviv. Les auteurs utilisent la notion de *discordance* résidentielle pour caractériser la différence entre les caractéristiques d'un agent et celles de ses voisins. Cette *discordance* est représentée par une variable stochastique, et elle peut donc différer pour deux individus au profil similaire. Deux sources[6] de discordance sont identifiées dans ce premier modèle, les facteurs religieux (trois catégories) et architectural (deux catégories d'immeubles : style *oriental* préféré par les populations arabes et style *blocks* préféré par les israéliens juifs). Le modèle est élaboré à partir du couplage d'un AC utilisé pour représenter les infrastructures urbaines (immeubles, voies) et gérer les voisinages, et d'un SMA représentant les agents-ménages et formalisant leurs comportements en matière de choix résidentiels. Le modèle comprend deux étapes, la première concernant la décision de quitter son logement, la seconde le choix d'un nouveau logement. Le moteur de ces décisions est l'éventuel sentiment de *discordance* que l'individu ressent relativement à son environnement. Les simulations reproduisent l'évolution du peuplement sur 100 itérations, la situation initiale correspondant à celle de 1955, et le pas de temps 40 à celle de 1995[7]. Les résultats des simulations sont confrontés aux données correspondant aux phénomènes observés pour ces 40 premières années. La calibration du modèle a été faite à partir de critères observés au niveau macro-géographique : d'une part l'évolution de la part de la population arabe dans la population totale de Yaffo, d'autre part un indice mesurant le degré de ségrégation de la répartition de la population suivant son groupe culturel. C'est à partir de cette confrontation que les paramètres-clés du modèle ont été estimés par essais et erreurs (une vingtaine de simulations a été effectuée pour chaque configuration de paramètres). Les valeurs

[6] D'un point de vue théorique le modèle peut intégrer un nombre quelconque de facteurs de discordance, chacun étant associé à un poids relatif (paramètre à estimer).

[7] En 1995 la population de Yaffo est de 39 000 personnes. Les arabes chrétiens et musulmans représentent alors 30% de la population, contre 8% en 1961 (avant la guerre de 1948 Yaffo était une ville arabe de 70 000 habitants) [BEN 02].

des paramètres permettant de reproduire au mieux les phénomènes observés au niveau macro-géographique, sont ensuite interprétées relativement aux hypothèses initiales des auteurs. Les résultats des simulations les amènent à conclure que les sensibilités aux voisinages « religieux » et « architectural » existent mais qu'ils sont de faible intensité, dans le sens où les paramètres associés ont des valeurs faibles mais non nulles. En effet, les simulations qui correspondent à une hypothèse d'absence totale de ces mécanismes de ségrégation et/ou de préférences[8] architecturales sous-estiment notamment la part de la population arabe dans la population totale de Yaffo en 1995. Inversement, des valeurs trop élevées de ces sensibilités aux caractéristiques de l'environnement conduisent également à des situations peu conformes à l'observation. Ces deux facteurs de *discordance*, relatifs respectivement à l'environnement culturel et architectural, sont ainsi nécessaires et suffisants pour reproduire l'émergence de la structure ségrégée actuelle, sans qu'il y ait à introduire d'autres contraintes comme les prix fonciers par exemple.

Chacun de ces trois modèles formalise le processus de choix résidentiel au niveau des individus suivant une procédure similaire. Seul le critère de choix diffère, localisation plus avantageuse en termes d'accessibilité globale dans le premier cas, en fonction des caractéristiques du logement sous contraintes de coût et d'accessibilité dans le second, suivant l'environnement culturel dans le troisième. En revanche leurs objectifs sont très différents, le premier cherchant simplement à reproduire un *type* de structure spatiale, les deux autres visant à reproduire la réalité observée à un niveau agrégé.

Ces deux derniers modèles s'inscrivent cependant dans des courants différents et peu inter-reliés. Le modèle de Dortmund s'inspire à la fois des travaux de Orcutt [ORC 57] sur la microsimulation, de ceux de Hägerstrand [HÄG 70] sur la *time-geography*, et des modèles classiques de transport. Quant au modèle de Yaffo, il s'inscrit dans la lignée des modèles développés avec les AC et les SMA. D'un point de vue méthodologique de nombreux points les rassemblent. Ainsi le déroulement des règles décrivant les choix des individus, le type d'introduction de la dimension stochastique, la forme du calibrage à partir des données observées sont conceptuellement similaires. Cette similarité ne concerne cependant que certains types d'application et les potentialités offertes par ces formalismes se distinguent sur plusieurs points. La micro-simulation intègre bien les intentions des acteurs, les interdépendances entre leurs actions, les interactions avec leur environnement, mais elle ne formalise pas les communications entre les agents qui jouent un rôle essentiel dans la plupart des applications des SMA. Sont plutôt formalisées des hypothèses sur les résultats de ces communications que l'émergence même d'une action suite à un échange de messages. Ceci dit, dans le dernier exemple présenté ci-dessus, c'est aussi la perception par l'agent de son environnement qui joue un rôle clé dans le modèle et non le processus de communication entre les agents. Il y a ainsi

[8] Cette hypothèse correspond à une valeur nulle des deux paramètres , mesurant respectivement la sensibilité à l'environnement culturel et architectural.

des convergences entre ces deux champs de modélisation qui tranchent avec le peu de communications qu'il y a eu entre ces deux communautés de modélisateurs, alors que les avancées technologiques leur ont en fait permis d'avancer, en parallèle, dans une même direction. Confrontant les travaux correspondant à ces deux démarches, [BOM 04] proposent l'idée d'évoluer vers une synthèse de ce qu'ils appellent les paradigmes SMA et microsimulation, après avoir mis en évidence les principales différences et similarités.

7.4. Modèles agent pour simuler la dynamique des systèmes de villes

Dans une perspective interurbaine il s'agit de rendre compte de l'émergence des différenciations entre les villes. D'ailleurs, pour comprendre l'évolution d'une ville donnée, parvenir à identifier les mécanismes sous-jacents à sa croissance ou au contraire à son déclin, il ne suffit pas de rechercher les facteurs explicatifs dans ses caractéristiques propres en termes de spécialisation économique, image ou forme de gouvernance. Sa place relativement aux autres villes du ou des systèmes de villes auxquels elle participe est déterminante par le biais des interactions qui opèrent entre elles, traduisant des relations de complémentarités et de concurrence. Le fait de penser les villes dans leurs interdépendances, dans leurs complémentarités fonctionnelles, dans leur organisation hiérarchique au sein d'un territoire donné est ancien, et en 1841 déjà est évoqué « un *système* général de villes » (Renaud, cité par [ROB 82]). Un demi-siècle plus tard Reclus [REC 95] décrit l'étroite imbrication entre les configurations hiérarchiques et spatiales des villes sous une forme très proche d'un modèle formel: la plus grande ville se trouverait au centre du pays et *« les villes secondaires se seraient réparties à des intervalles égaux sur le pourtour, espacées rytmiquement, et chacune d'entre elles aurait eu son cortège planétaire de villes inférieures, ayant chacune son cortège de villages* ». La première formalisation de lois explicatives de telles régularités hiérarchiques et spatiales a été proposée par Christaller en 1933 [CHR 33]. Il développe la théorie des places centrales, ce modèle intégrant des logiques fonctionnelle (niveaux de biens et de services) et géométrique (aires de marché héxagonales). Un peu plus tard Zipf [ZIP 49] exprime la régularité de forme de la distribution statistique des tailles des villes en fonction de leur rang. Dans son article intitulé « *Cities as systems in systems of cities* », Berry interprétait cette organisation rang-taille des villes comme une expression de la *complexité* de l'espace économique que représente la ville et de la diversité des facteurs qui y interagissent [BER 64]. Il appelait déjà de ses vœux l'élaboration de « simulateurs urbains » qui permettent de tester les théories urbaines.

C'est à partir des années 1970 que sont développés les premiers modèles dynamiques des villes formalisés avec des *équations différentielles non linéaires* [FOR 69], [ALL 79], [WEI 88]. Ils s'appuient sur les théories de l'auto-organisation et la synergétique. Une forte attention y est portée au concept de bifurcation et à son

interprétation dans le domaine des dynamiques urbaines. Les interdépendances entre les niveaux des acteurs et des structures macro-géographiques sont également évoqués dans ces modèles : « *…the 'urban hierarchy' and the 'city structures' that emerge, arise from permanent dialogue between the individuals, their goals and aspirations, and the macro-structure that they have allowed to emerge*" ([ALL 97], p78).

Cet historique très simplifié montre combien les concepts de système, de complexité, d'auto-organisation, imprègnent la modélisation urbaine depuis de nombreuses années. Sur un plan méthodologique la simulation agent offre d'évidents avantages de souplesse relativement aux équations différentielles quand il s'agit de combiner des mécanismes de nature différente. Sur le plan conceptuel l'accent est davantage mis, dans les applications, sur l'émergence et une explicitation des mécanismes *bottom-up*.

Alors que les modèles utilisant les équations différentielles pour formaliser les dynamiques spatiales sont toujours développés au niveau d'entités géographiques, *la modélisation agent*, comme cela l'a été souligné plus haut, *ne détermine pas a priori le niveau élémentaire*. Ainsi, quand on s'intéresse à l'émergence et à l'évolution de structures observables au niveau des systèmes de villes, deux choix sont possibles. Soit on considère que les configurations urbaines sont le résultat de millions de décisions individuelles interdépendantes et qu'il est essentiel de prendre en compte la diversité de ces choix individuels, celle-ci pouvant être à la source de changements qualitatifs notables à un niveau d'organisation supérieur. Les individus représentent alors les entités élémentaires du modèle. Soit on considère que les propriétés du système de villes résultent de la forme des interactions entre les villes (échanges migratoires, flux de marchandises, flux d'information…), et que ces interactions opèrent suivant des logiques de niveau meso-géographiques peu sensibles à la diversité des décisions individuelles. Les villes sont alors les entités élémentaires du modèle. Les deux exemples exposés dans la suite relèvent de cette approche.

7.4.1. Le modèle SimPop : l'émergence d'un système de villes

Le modèle SimPop vise à simuler l'émergence d'un système de villes à partir d'une situation initiale où le peuplement est à peu près régulièrement réparti sur l'ensemble du territoire. L'objectif est d'identifier l'ensemble minimal de règles nécessaires pour qu'émerge un système de villes hiérarchisé et dont l'organisation spatiale présente une régularité semblable à celle des systèmes observés. Ce modèle a été développé à l'aide d'un SMA un peu particulier puisque les agents représentent des entités géographiques, et sont de ce fait non mobiles contrairement à ce qui est fait dans la plupart des applications utilisant les SMA. Le choix s'est porté sur ce mode de formalisation pour l'intérêt que représente le protocole de communication

entre agents pour formaliser les interactions entre les entités de peuplement d'une manière relativement souple ([BUR 96], [SAN 97]).

Chaque ville est caractérisée par sa taille (mesurée par le nombre total d'habitants), ses fonctions (économiques et administratives) et les portées qui leurs sont associées (quatre niveaux de proximité pris en compte), et enfin par la répartition de la population active par secteur d'activité. Partant d'une situation initiale où la seule fonction économique est agricole, les villes émergent progressivement, et acquièrent au fur et à mesure des niveaux fonctionnels de plus en plus élevés. En parallèle leurs activités se diversifient de plus en plus (quatre niveaux de fonctions commerciales, deux niveaux de fonctions administratives, deux types de villes industrielles) et leurs possibilités d'interagir avec les agents représentant des villes et des villages de plus en plus éloignés s'accroissent. La croissance des villes est fonction de leur capacité à valoriser leur production de biens et de services. Chaque ville a une production dans les secteurs d'activité correspondant à son niveau de fonction, et une demande pour l'ensemble des biens et services produits dans le système. Le processus d'échanges entre les entités géographiques (villes et villages) est formalisé à l'aide des communications entre agents : chaque ville productrice envoie un message à l'ensemble des entités de peuplement correspondant à sa portée géographique. Les aires d'influence des différentes villes se recouvrant partiellement, certains villages et villes de moindre niveau que les villes « offreuses » reçoivent des messages de plusieurs villes. Les possibilités d'échange sont ainsi multipliées et les villes « acheteuses » envoient à leur tour des messages indiquant leur demande. Une série d'échanges de messages suit pour rendre compte du processus de choix de part et d'autres, la ville productrice ayant à répartir sa production, la ville demandeuse ayant à répartir ses achats. Dans ce modèle très simplifié, ces mécanismes de choix reposent sur une logique de prorata en fonction de la distance.

A chaque étape (avec un pas de temps de 10 ans) il s'agit de calculer l'importance de la population en chaque lieu. Le taux de croissance est déterminé à la fin de chaque cycle à partir d'une loi normale dont la moyenne[9] dépend du niveau de fonction (taux de croissance d'autant plus élevé que le niveau de fonction est élevé, suivant l'hypothèse qu'une ville d'un rang plus élevé est plus attractive), et de la capacité à écouler les produits fabriqués (s'il subsiste des « invendus » la moyenne est minorée); et dont l'écart-type (qui rend compte du degré de variabilité du taux de croissance des villes de même type) est un des paramètres du modèle.

[9] La valeur de base correspond à des estimations très globales qui ont été faites par des historiens (Bairoch [BAI 88] notamment)

Le modèle a été construit pas à pas, ce qui a permis de mettre en évidence les conditions nécessaires pour obtenir une dynamique de hiérarchisation qui se maintient sur la durée, telle qu'elle est représentée sur la figure 7.2.

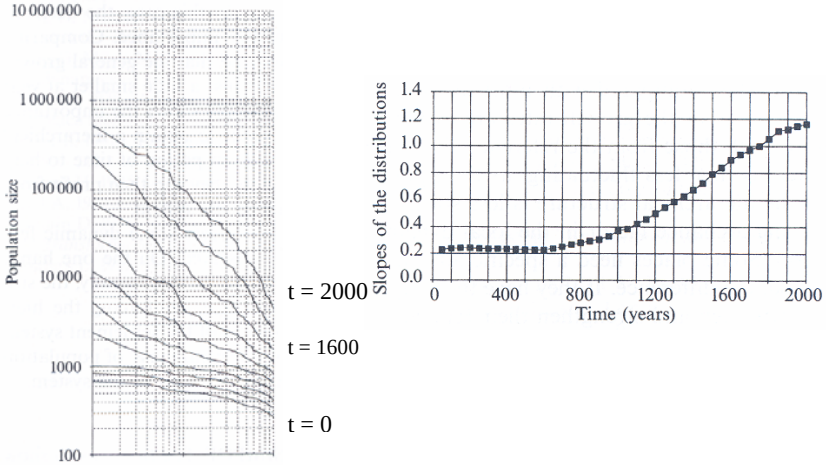

Figure 7.2. Représentation des courbes rang-taille simulées par le modèle SimPop entre t=0 et t=2000, et évolution de la valeur des pentes des droites d'ajustement correspondantes

A un stade initial il faut qu'il y ait, assez naturellement, une capacité à dégager un surplus (production plus importante que la consommation) pour que le village se transforme en ville. Une fois que des villes ont émergé, l'existence d'interactions entre elles apparaît comme une condition nécessaire à l'émergence d'une hiérarchie urbaine. Des simulations ont en effet été effectuées sans que soit pris en compte la procédure des échanges commerciaux : des villes émergent, mais de façon relativement uniforme, il n'y a pas de différentiel qui se crée et le processus de hiérarchisation est alors très lent et s'interrompt à un niveau très bas. Au bout d'un certain temps, la population totale tend elle aussi à stagner. Le jeu des interactions entre les agrégats de peuplement apparaît ainsi comme une condition nécessaire à l'émergence d'un système de villes hiérarchisé et au maintien de la dynamique de la population. Enfin, à un niveau plus global, la capacité du système à créer de nouvelles innovations, formalisée par l'acquisition de nouvelles fonctions, ressort également comme fondamentale. Celles-ci induisent constamment de nouvelles possibilités de différenciation, d'accentuation de l'avance de certaines villes relativement à d'autres. Ainsi, des simulations ont été effectuées sans la possibilité d'acquérir des fonctions industrielles : le système cesse alors de se hiérarchiser vers le 15^{e}, 16^{e} siècle et stagne à partir de là. Le problème est d'ailleurs d'ordre plus général et la possibilité d'acquérir des fonctions industrielles à partir d'une certaine date déterminée de façon exogène ne le résout que partiellement : si

le nombre de fonctions est déterminé a priori, cette stagnation arrivera fatalement, même si c'est plus loin dans le temps. L'enjeu d'un point de vue méthodologique est donc de parvenir à endogénéiser l'émergence de nouvelles innovations. Une fois validé le modèle a pu être utilisé pour explorer quelles conditions conduisaient à des configurations plutôt monocentriques ou polycentriques (figure 7.3).

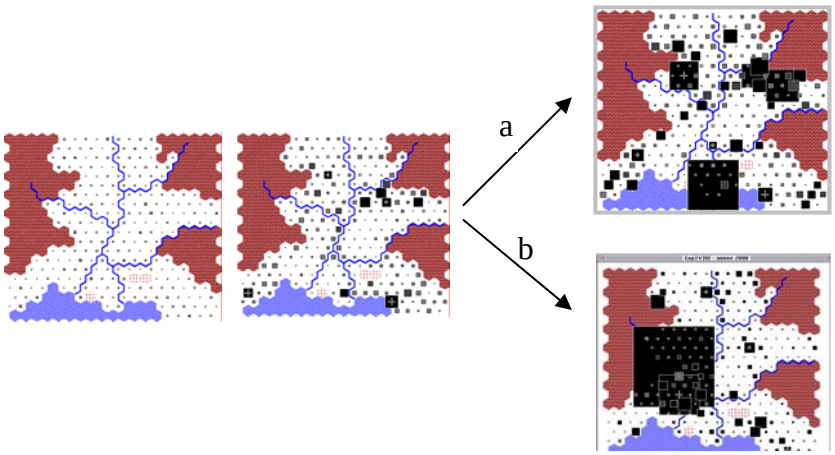

Figure 7.3. Extraits de simulations avec le modèle SimPop : émergence de deux configurations différentes du système de villes

7.4.2. Le modèle EUROSIM : la dynamique des villes européennes

Ce modèle est conceptuellement proche du précédent mais il correspond à d'autres temporalités et le processus de l'émergence y prend un sens différent. On part d'une situation initiale très structurée, les villes européennes en 1950, et cette structure pèse évidemment fort sur l'évolution postérieure (principe de *path dependence*). L'objectif est d'identifier l'ensemble des règles qui seraient nécessaires et suffisantes pour reproduire une évolution qui soit cohérente du point de vue de la théorie urbaine et qui corresponde au niveau macro-géographique à ce que l'on a pu observer pour les villes européennes durant la période 1950-2000. Il s'agit d'identifier les mécanismes qui ont engendré des croissances différentielles entre les villes durant celle période, sans pour autant viser à reproduire avec exactitude la trajectoire précise de chaque ville. Cette dernière est plutôt considérée comme une des trajectoires possibles étant donnés la situation de cette ville en 1950, sa spécialisation, son contexte spatial etc.

Les mécanismes liés à la spécialisation des villes et aux interactions entre les villes sont au cœur du modèle. Suivant la théorie classique de la base économique,

on distingue les activités exportatrices, répondant à une demande externe, et qui constituent le moteur de l'économie de la ville, et les activités induites tournées vers la demande de la population de la ville. S'inspirant de ce principe, les activités sont réparties en trois catégories dans ce modèle :

- activités destinées au marché intra-urbain;

- activités correspondant à une demande obéissant à une logique de proximité (figure 7.4.a), suivant des portées évoluant au cours du temps, ou d'appartenance nationale (figure 7.4.b) ;

- activités hautement spécialisées dont la commercialisation correspond à une logique de réseau (figure 7.4.c). A cet échelon supérieur de la hiérarchie urbaine, on considère en effet que les interactions porteuses de dynamique et de changement sont celles qui s'inscrivent dans des réseaux de villes concentrant les activités du plus haut niveau, et que la proximité géographique y est peu discriminante.

Le cœur du modèle concerne la constitution de ces réseaux et les mécanismes d'échanges entre les villes ([SAN 05], [FAV 05]). A chaque cycle de la simulation (le pas de temps est de un an), chaque ville se constitue un réseau de villes « clientes », pour *chacune* de ses spécialisations. Ce réseau est partiellement stable (les meilleurs villes clientes des étapes précédentes sont d'abord sélectionnées), partiellement renouvelé par tirage aléatoire. La taille du réseau n'est pas fixée à priori, la sélection de nouvelles villes se poursuivant jusqu'à ce que la demande potentielle conjointe des villes sélectionnées dépasse k fois l'offre de la ville productrice, k étant un paramètre du modèle. Chaque ville productrice émet ensuite des messages proposant une part de sa production à chacune des villes appartenant à son réseau. Ces villes potentiellement clientes peuvent faire partie de plusieurs réseaux, et c'est par ce biais que se joue les mécanismes de compétition entre les villes. Les échanges de messages opèrent en parallèle pour quelques centaines de villes et une dizaine de spécialisations. Les échanges effectifs sont ensuite opérés entre les villes suivant des règles de choix et de prorata dans les situations où plusieurs possibilités existent, et les transferts de richesse correspondants sont effectués. Ces opérations sont réitérés jusqu'à ce qu'il n'existe plus d'offre correspondant à une demande ou vice-versa. La croissance des villes en termes de richesse et de population est ensuite évaluée en fonction de la réussite de ces échanges. Le gain de richesse et l'existence d'un potentiel de marché non satisfait durant la période sont des facteurs qui tendent à augmenter la croissance de la ville, alors que l'existence d'invendus tend au contraire à la limiter. Par ailleurs, la population active est redistribuée en réponse à l'éventuel déséquilibre entre l'offre et la demande pour les différents produits et services échangés.

La souplesse de l'outil SMA est évidemment un avantage pour formaliser de tels processus d'échanges entre les villes. Mais il y a aussi un intérêt du point de vue théorique : la « philosophie » agent amène à définir les règles de fonctionnement au niveau local sans jamais fixer a priori les ordres de grandeur globaux concernant la taille des

réseaux ou les volumes totaux échangés. Les différenciations inter-urbaines émergent du jeu de compétition qui s'opère au cours de ces échanges à l'intérieur de ces réseaux reconstitués à chaque période. Ce fonctionnement correspond à l'hypothèse que chaque ville dispose d'une information partielle sur l'état du système urbain à un moment donné.

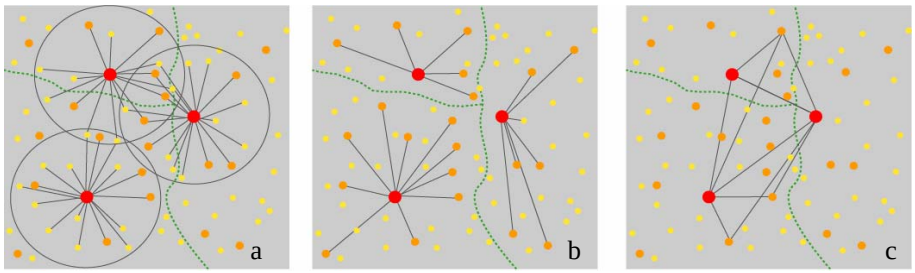

Figure 7.4. Trois logiques d'interactions entre les villes (source : [FAV 05])

7.5. Conclusion :

La modélisation agent (dans sa conception la plus large), de par les possibilités méthodologiques et techniques qu'elle offre, amène à renouveler la réflexion sur les processus à la base du changement urbain, sur les interrelations entre les comportements des acteurs et les transformations des configurations spatiales. Formaliser au niveau des individus ou d'entités collectives, privilégier les mécanismes *bottom-up* ou *top-down*, formaliser le rôle de l'espace à travers les effets de proximité ou le fonctionnement en réseau, sont des questions pour lesquelles cette formalisation n'implique pas de choix unique a priori. Ainsi, pour la question du niveau de modélisation, les moyens actuels permettent de dépasser un choix caricatural entre deux attitudes extrêmes qui consisteraient soit à choisir comme entités élémentaires des agrégats géographiques avec pour seule justification l'existence de données statistiques correspondant à cet échelon d'observation, soit opter systématiquement pour le niveau le plus fin sous le prétexte que cela est techniquement possible. L'augmentation des ressources en mémoire des ordinateurs et la souplesse offerte par les SMA sur le plan méthodologique, offrent des possibilités de choix sans comparaison avec celles qui prévalaient lors du développement des premiers grands modèles urbains dynamiques. La réflexion sur le sens des entités élémentaires relativement aux objectifs du modèle, sur le jeu des hypothèses relatives aux interactions correspondantes et les implications théoriques qui en découlent devient d'autant plus centrale que les choix possibles sont nombreux. Ségrégation et différentiel de croissance par exemple mettent en jeu des processus opérant à des niveaux différents pour simuler l'émergence d'une différenciation spatiale. Les SMA privilégient les phénomènes suivant une logique *bottom-up*, mais ils permettent de combiner dans un même modèle des agents correspondant à des niveaux géographiques différents. Ainsi, chaque fois que l'on est capable de repérer des régularités et des fonctionnements qui ont

un effet sur la dynamique du système à d'autres niveaux d'organisation, il est possible de formaliser par des agents les entités correspondantes. Il devient ainsi possible de combiner des logiques relevant de niveaux variés. C'est du développement de tels modes de combinaison que l'on peut attendre des avancées dans la modélisation urbaine.

7.6. Bibliographie

[ALL 97] ALLEN P., *Cities and regions as self-organizing systems; models of complexity*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1997.

[ALL 79] ALLEN P.M., SANGLIER M., "A Dynamic Model of Growth in a Central Place System", *Geographical Analysis*, 11, p. 256-272. 1979.

[BAI 88] BAIROCH P., BATOU J., CHEVRE P., *La population des villes européennes de 800 à 1850*, Centre d'histoire économique internationale, DROZ, Université de Genève, 1988.

[BAR 03] BARROS J., Simulating Urban Dynamics in Latin American Cities, *Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation*, Southampton, 2003, (www.geocomputation.org/2003/)

[BAT 01] BATTY M., "Polynucleated Urban Landscapes", *Urban Studies*, vol. 38, 4, p.635-655, 2001.

[BEN 02] BENENSON I., OMER I., HATNA E., "Entity-based modelling of urban residential dynamics: the case of Yaffo", Tel Aviv, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 29, 491-512, 2002.

[BEN 04] BENENSON I., TORRENS P.M., *Geosimulation; Automata-based modeling of urban phenomena*, Wiley, 2004.

[BER 64] BERRY B.J.L., « Cities as systems within systems of cities », *Papers of the Reginal Science Association*, 1964.

[BOM 04] BOMAN M., HOLM E., Multi-agent systems, time geography, and microsimulation, in Olsson M-O., Sjöstedt G. (eds.), *Systems Approaches and their Applications*, Kluwer Academic, 95-118, 2004.

[BUR 96] BURA S., GUERIN-PACE F., MATHIAN H., PUMAIN D., SANDERS L., « Multi-agents system and the dynamics of a settlement system », *Geographical Analysis*, vol.28, n°2, p.161-178, 1996.

[CHR 33] CHRISTALLER W., *Die zentralen Örte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die gesetz Massigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städitschen Funktionen*, Jena, Fischer Verlag, 1933.

[FAV 05] FAVARO J-M., GLISSE B., MATHIAN H., PUMAIND., SANDERS L., Artificial inteligence and collective agents: a generic multi-agent model for simulating the evolution of urban systems, (1) Eurosim: a predictive short term simulation model, poster, ECCS'05 (*European Conference on Complex Systems*), 2005.

[FOR 69] FORRESTER J.W., *Urban Dynamics*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1969.

[GUE 93] GUÉRIN-PACE F., *Deux siècles de croissance urbaine*, Paris, Anthropos Villes, 1993.

[HÄG 53] HÄGERSTRAND T., *Innovation diffusion as a spatial process*, Chicago, University of Chicago Press, 1953.

[HÄG 70] HÄGERSTRAND T., " What about people in regional science?", *Papers of the Regional Science Association*, 24, p.7-21, 1970.

[HOL 04] HOLM E., HOLME K., MÄKILÄ K., MATTSON-KAUPPI M., MÖRTVIK G., "The microsimulation model SVERIGE; content, validation and applications", *SMC*, Kiruna, Sweden, 2004 (www.sms.kiruna.se)

[MOE 02] MOECKEL R., SCHÜRMANN C., WEGENER M., "Microsimulation of urban land use", *Proceedings of the 42nd Congress of the European Regional Science Association (ERSA)*, Dortmund, 2002.

[MOR 93] Moriconi-Ebrard F., *L'Urbanisation du Monde depuis 1950*, Paris, Anthropos, 1993.

[ORC 57] Orcutt, G.H., « A new type of socio-economic system, *Review of Economics and Statistics*, n°58, p773-797, 1957.

[POR 97] PORTUGALI J., BENENSON I., OMER I., "Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city", *Environment and Planning B*, 24, p. 263-285, 1997.

[PUM 97] PUMAIN D. "Pour une théorie évolutive des villes", *l'Espace Géographique*, n°2, p. 119-134, 1997.

[PUM 00] PUMAIN D. "Settlement systems in the evolution", *Geografiska Annaler*, 82B, 2, p. 73-87, 2000.

[ROB 82] ROBIC M-C., « Cent ans avant Christaller, une théorie des lieux centraux », *l'Espace Géographique*, n°1, 1982.

[REC 95] RECLUS E., « The evolution of cities », *The Contemporary Review*, 67,-2, 1895, p.246-264.

[SAN 97] SANDERS L. PUMAIN D. MATHIAN H. GUÉRIN-PACE F. BURA S., "SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism", *Environment and Planning B*, 24, p. 287-305, 1997.

[SAN 99] SANDERS L., "Modelling within a self-organizing or a microsimulation framework: opposition or complementarity", *Cybergeo* n°90, 1999. (www.cybergeo.presse.fr).

[SAN 05] SANDERS L., FAVARO J-M., GLISSE B., MATHIAN H., PUMAIN D., Intelligence artificielle et agents collectifs: le modèle EUROSIM, *Revue Internationale de Géomatique* (à paraître), 2005.

[SCH 71] SCHELLING T.S. "Dynamic Models of Segregation", *Journal of Mathematical Sociology*, 1 (2), 1971, p. 143-186.

[SPI 00] SPIEKERMAN K., WEGENER M., " Freedom from the Tyranny of Zones: Towards New GIS-based Spatial Models", in *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models, GISDATA 7*, Fotheringham S., Wegener M. (dir.), Taylor & Francis, p.45-61, 2000

[WEI 88] Weidlich W., Haag G. eds., *Interregional migration, Dynamic theory and comparative analysis*, Berlin, Springer Verlag, 1988.

[ZIP 49] ZIPF G.K., *Human behavior and the principles of least effor*t, Addinson-Wesley Press, Cambridge, Mass, 1949.