



**HAL**  
open science

## Les systèmes multi-agents pour modéliser l'émergence des réseaux urbains

France Guérin-Pace, Hélène Mathian, Denise Pumain, Lena Sanders,  
Stéphane Bura

► **To cite this version:**

France Guérin-Pace, Hélène Mathian, Denise Pumain, Lena Sanders, Stéphane Bura. Les systèmes multi-agents pour modéliser l'émergence des réseaux urbains . Bocquet Appel J.P., Courgeau D, Pumain D. (eds) Spatial analysis of Biodemographic Data, 16, John Libbey-INED, Congress and Colloquia, pp.281-309, 1996. halshs-01707337

**HAL Id: halshs-01707337**

**<https://shs.hal.science/halshs-01707337>**

Submitted on 6 Apr 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

in: Bocquet Appel J.P. Courgeon D. Pumain D (ed)  
1996, Spatial Analysis of Biodemographic Data. John  
Libbey - INED, Congress and Colloquia, 16, 281-309

---

## Les systèmes multi-agents pour modéliser l'émergence des réseaux urbains

France GUÉRIN-PACE\*, Hélène MATHIAN\*\*,  
Denise PUMAIN\*\*, Lena SANDERS\*\*, Stéphane BURA\*\*\*

---

### Introduction

Si de nombreuses théories économiques et spatiales ont été avancées pour expliquer certains aspects du processus d'urbanisation, les modélisations visant à reproduire la genèse des systèmes de peuplement et comprendre leur forme d'organisation spatiale sont, en revanche, rares.

Or, la forme de la répartition d'une population sur son territoire est une composante essentielle des rapports entre une société et son environnement. La configuration du peuplement reflète très précisément les modalités d'action des sociétés sur leur milieu, de même qu'elle interfère avec les représentations que les populations ont du milieu. Aujourd'hui, nos sociétés s'interrogent même sur une possible modification de la répartition de l'habitat sur le territoire et les discussions actuelles relatives à l'aménagement du territoire en témoignent.

### De la théorie au modèle

#### *Les théories de la genèse urbaine*

Sur le très long terme, les systèmes de peuplement évoluent dans le sens d'une concentration croissante de la population dans des agrégats de plus en plus grands. Le processus d'urbanisation s'est accéléré depuis la révolution industrielle et la répartition du peuplement a fondamentalement changé en France. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, plus des trois quarts de la

---

\* Institut National d'Études Démographiques, Paris.

\*\* Equipe P.A.R.I.S.

\*\*\* LAFORIA, Université Paris VI.

population se dispersaient dans de très nombreux villages ou hameaux et ce sont aujourd'hui les villes qui concentrent près de 80 % des habitants, avec une densité plus forte. Par analogie avec la transition démographique, on peut appeler « transition urbaine » ce changement fondamental dans le rapport des populations à leur territoire, ce passage d'une économie essentiellement agricole fondée sur les ressources locales à une mise en réseau progressive d'un ensemble de villes (Zelinski, 1971).

Dans une économie agraire, villageoise, la distribution de l'activité humaine est fortement contrainte par les ressources et les rythmes de l'environnement naturel. En effet, les villages valorisent essentiellement les ressources d'un milieu local. Les agriculteurs exploitent un finage dont le rayon est très vite limité par l'importance des trajets et des transports de charge à effectuer pour la culture : en général, de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Les villages sont de faible dimension car ils ne peuvent nourrir une large population sur cette superficie limitée. Ils sont nombreux, proches les uns des autres et assez régulièrement espacés en milieu homogène. On peut considérer que, pour ces villages, la dynamique de la production et la possibilité d'accumuler des richesses dépendent avant tout des conditions de ressources locales (en incluant dans celles-ci les caractéristiques climatiques et leurs aléas, qui jouent à des échelles plus vastes, au moins régionales). En ce sens, l'évolution des villages dépend avant tout des ressources de leur site.

Au contraire, et ceci dès leur apparition, les villes doivent leur existence à la mise en réseau de sites éloignés, elles tirent parti de richesses de situation. Les historiens proposent deux formes de genèse urbaine qui expriment cette mise en réseau : une émergence locale par grossissement de certains villages qui deviennent des marchés agricoles, ou bien un ensemble de lieux ayant d'emblée des fonctions de type urbain, spécialisés dans les échanges à grande distance. Qu'elles doivent leur origine à la commercialisation des surplus de l'agriculture (Bairoch, 1985) ou qu'elles expriment l'imposition de prélèvements par un pouvoir, de nature politique et/ou religieuse (Duby, 1984), les villes exploitent toujours leur position dans des réseaux qui mettent en communication des lieux différents. Au cours du temps, l'accumulation de richesses par les activités commerciales et l'échange permettent la complexification de la vie sociale, la division du travail et la diffusion par les villes des innovations. Les grands ensembles d'innovations qui modifient les fonctions des villes, leurs spécialisations, apparaissent en général de façon cyclique (on parle ainsi par exemple de la première, puis des deuxième et troisième « révolutions » industrielles). Une vague d'innovations apparaît et se diffuse dans l'ensemble des villes, à la faveur des échanges d'information et de la situation de concurrence dans laquelle sont plongés les acteurs urbains. Les cycles d'innovation favorisent le maintien de la position dominante des plus grandes villes. Par leur dimension, qui multiplie les possibilités d'interaction, les plus grandes villes constituent des milieux favorables à la création, à l'apparition d'innovations. Même si elles ne sont pas directement à l'origine de la nouveauté,

elles sont les premières à pouvoir s'y adapter car elles possèdent un milieu social bien informé et des structures suffisamment diversifiées.

La richesse créée par le travail humain, les augmentations de la productivité et les innovations successives permettent le développement urbain ultérieur. Les villes deviennent plus nombreuses et plus grandes, l'accroissement de la vitesse et de l'efficacité des communications élargit la portée spatiale de leur activité. Tout se passe comme si l'espace géographique avait rétréci, du fait de la plus grande accessibilité des lieux. Cette tendance à la connexion généralisée et cet élargissement des horizons de la vie quotidienne avaient déjà été notés à l'époque de l'avènement des chemins de fer, par un saint-simonien comme Chevalier (1832). Ces modifications profondes des organisations territoriales, du fait de l'amélioration technique des communications, ont été analysées à maintes reprises, par exemple par Janelle (1969) ou par Juillard (1972) sous les appellations de « contraction » ou de « convergence » de l'espace-temps.

#### *Les régularités observées*

En dépit du bouleversement dans la répartition du peuplement entre milieu rural et urbain, des effets territoriaux dus à la contraction de l'espace au cours du temps, par-delà les bouleversements de la répartition de la population liés au passage d'une économie agraire à une économie industrielle et tertiaire, par-delà le processus multiséculaire d'accroissement de la richesse, de la population, du nombre et de la dimension des villes, on observe une très grande persistance de la configuration spatiale et hiérarchique du peuplement. Elle se manifeste en particulier par la métastabilité de la distribution statistique des tailles des unités de peuplement. C'est une distribution lognormale, très dissymétrique (souvent assimilée à une distribution de Pareto quand seules les villes sont considérées). Ce modèle est très général : il a été observé aussi bien pour des unités de peuplement préhistoriques (van der Leeuw, 1990 ; Fletcher, 1986) que pour des ensembles de villages et de villes au cours de l'histoire (par exemple, Baker, 1969, de Vries, 1984 ; Lepetit, 1988). Ce modèle persiste lors de périodes de croissance comme au cours des époques de régression de la population (de Vries, 1984). Cette relation entre la population des villes et leur rang dans la hiérarchie urbaine, appelée « loi rang-taille » à la suite de Zipf (1949), correspond à des formes d'organisation spatiale dans lesquelles, sans atteindre toutefois la rigueur géométrique prédite par les modèles spatiaux de la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933), l'espacement des agrégats est assez régulier, et d'autant plus important qu'ils sont de grande taille (King, 1961 ; Vlor, 1979 ; Pumain, 1984 ; Guérin-Pace, 1991).

#### *Les objectifs du modèle*

L'objectif du modèle présenté ici est de reproduire l'émergence des systèmes de villes sur la longue durée. On cherche ainsi à élaborer un modèle dynamique qui permette de simuler le passage d'un peuplement en

villages à un système de villes hiérarchisé. Il s'agit de déterminer quels sont les paramètres qui rendent compte de la concentration progressive de la population dans des entités de plus en plus grandes et aux dimensions de plus en plus contrastées. Un tel modèle pourrait être utilisé pour simuler divers scénarios et tester des hypothèses quant à l'évolution plus ou moins probable de telle ou telle forme du peuplement.

Ce modèle doit nécessairement mobiliser les connaissances et les théories relatives à l'évolution urbaine mais impérativement prendre en compte les propriétés spatiales des systèmes de peuplement.

En premier lieu, on cherche à reproduire la lente émergence et la persistance d'une très forte différenciation des villes par leur taille, puisque l'organisation hiérarchique est la propriété majeure des systèmes de villes. On doit également intégrer dans le modèle un processus plus ou moins continu de différenciation des unités urbaines en fonction de la division du travail et des représentations sociales. Ce processus est en partie sporadique, du fait de la mise en valeur de ressources locales, et en partie systématique, du fait des vagues d'innovation qui se diffusent, de façon plus ou moins hiérarchique, dans le système.

Au cours du temps, le système est en expansion, du fait de l'accroissement de la taille et de la diversité de ses éléments. Deux phases de l'urbanisation au moins doivent pouvoir être simulées : une lente progression avec des oscillations dans une économie essentiellement agricole, puis une bifurcation majeure avec la révolution industrielle qui entraîne la transition urbaine au cours des deux derniers siècles (Bairoch, 1985). Les paramètres décisifs sont la croissance démographique et économique, ainsi que l'accroissement considérable de la vitesse des communications qui a augmenté la fréquence et la portée de toutes les interactions dans le système et en a donc élargi les espacements (Janelle, 1969 ; Guérin-Pace, 1993).

Si le moteur de l'évolution est la création continue de nouveauté et de richesses dans le système, le mécanisme essentiel qui en régit la forme est celui de la concurrence entre les unités géographiques qui le composent pour capter et accumuler le produit de ces ressources. Le jeu de cette concurrence est permis par la circulation de l'information entre des unités qui se mettent ainsi en réseau. Il est donc très important de définir dans le modèle des interactions spatiales dont la portée augmente avec le temps et varie selon l'acquisition de nouvelles fonctions par les villes.

Il est indispensable qu'une modélisation de la dynamique d'un système de villes restitue l'ensemble des propriétés qui ont été ainsi observées dans de très nombreux pays anciennement urbanisés. L'organisation hiérarchique, résumée par la « loi rang-taille », la diversité fonctionnelle des villes et la permanence de ces structures *via* des processus quasistochastiques de croissance sont des caractéristiques essentielles. Elles doivent nécessairement être retrouvées dans les indicateurs qui décrivent l'organisation macroscopique de tout système de villes obtenu par simulation. Les régularités énoncées ci-dessus ont déjà fait l'objet de plusieurs tentatives de modéli-

sation, qui diffèrent davantage par la méthodologie employée que par les éléments de théorie urbaine pris en compte.

### Des modèles dynamiques pour les systèmes de villes

#### *Les modèles à base d'équations différentielles*

Le paradigme central des modèles dynamiques actuels est celui de l'auto-organisation qui stipule que la structure et l'évolution de systèmes observés à un niveau macroscopique dépendent des interactions entre des éléments ou des sous-systèmes décrits à un niveau méso- ou microscopique. Différentes formalisations ont été proposées pour simuler, souvent de façon seulement théorique, les interactions spatiales entre les éléments du système et leurs effets sur l'évolution des peuplements.

Certains modèles issus de la théorie des structures dissipatives, développée à l'École de Bruxelles autour de I. Prigogine, ont été adaptés par P. Allen à une problématique urbaine, sous forme d'un système d'équations différentielles complexes. Ce type de modèle est capable de simuler l'organisation spatiale et hiérarchique d'un ensemble de villes (Allen et Sanglier, 1979; White, 1977; 1978) et son évolution au cours du temps. Il permet d'évaluer les rôles respectifs des différents mécanismes introduits dans l'équation de changement et de déterminer quels sont les effets respectifs de différents processus (compétition, changement fonctionnel). D'autres auteurs ont élaboré des modèles dynamiques en introduisant des mécanismes d'adaptation entre l'offre et la demande dans des modèles classiques d'interaction spatiale (Wilson, 1981).

D'autres familles de modèles ont été développées dans le cadre de la synergetique, champ de recherche interdisciplinaire développé à Stuttgart autour de H. Haken. La synergetique regroupe un ensemble de techniques, de méthodes et de théories adaptées à l'analyse de l'évolution des systèmes complexes. Ces méthodes ont été utilisées pour simuler les migrations inter-régionales (Weidlich et Haag, 1988) et pour prévoir l'évolution de la configuration des populations d'un système de villes sous l'effet des migrations (Sanders, 1992). Ces modèles ont accordé un rôle plus général que les précédents à l'inertie observée dans les systèmes de villes, à la tendance du système à se reproduire dans ses mêmes structures en dépit des changements qui l'affectent.

Les modèles dynamiques ont permis de rapprocher les observations empiriques d'une théorie générale de l'auto-organisation dans les systèmes ouverts. Leur intérêt est ainsi principalement d'ordre conceptuel et théorique, voire didactique. En revanche, ces modèles utilisant les équations différentielles présentent de graves limites d'ordre technique. Il est difficile de combiner un trop grand nombre de facteurs dans une même équation non linéaire sans perdre le contrôle du sens de l'effet de chacun dans cette

combinaison. La multiplication des possibilités de bifurcations qui en résulte parfois n'est pas toujours compatible avec la réalité de l'évolution que l'on essaie de reproduire. Il arrive que les propriétés mathématiques de l'équation ne correspondent plus aux propriétés de l'espace dont on cherche à modéliser l'évolution.

Mais la principale pierre d'achoppement des modèles à base d'équations différentielles reste la prise en compte des interactions spatiales entre les éléments du système. Celles-ci ne peuvent être modélisées que sous une forme relativement simple : introduction de la distance ou des flux d'échanges entre couples de lieux. On peut ainsi modéliser les effets de la position relative des lieux, ainsi que la structuration des liens d'échange entre les différents points d'un territoire. Toutefois, la spatialité joue un rôle bien plus large dans la dynamique d'un système de peuplement. Les interactions ont des formes et des portées bien plus variées que celles que l'on peut décrire par les modèles à base d'équations différentielles.

#### *Des modèles formalisés avec des automates cellulaires*

D'autres types d'approche, reposant sur une formalisation par des règles, présentent à certains égards plus de souplesse et sont de ce fait très complémentaires des méthodes fondées sur les systèmes d'équations différentielles. Les modèles formalisés avec des automates cellulaires sont des modèles intrinsèquement spatiaux. L'intérêt des automates cellulaires pour la modélisation spatiale a été perçu assez tôt (Tobler 1979, Couclelis 1985) et plusieurs applications ont été développées à l'échelle des villes (White 1991, White et Engelen, 1994, Roy et Snickars 1995). L'espace est représenté par une grille dont chaque cellule est caractérisée par un certain état, en général défini de façon qualitative. Une cellule change d'état selon une règle qui tient compte de l'ensemble des états des cellules voisines. Ainsi, si l'on simule l'évolution de l'occupation du sol au sein d'une agglomération, un exemple de règle est qu'une cellule occupée par des activités industrielles devient une cellule aux fonctions résidentielles lorsque au moins trois des quatre cellules contiguës sont occupées par des logements. La formalisation par les automates cellulaires convient donc parfaitement à des applications où l'organisation spatiale du phénomène est au centre du processus de changement. Des règles plus complexes, incorporant des ordres de contiguïté plus larges, sont en général utilisées dans les modèles.

Lorsqu'il s'agit de simuler des processus de changement à la fois quantitatifs et qualitatifs et de gérer l'évolution de stocks de nature différente (par exemple, les nombres d'habitants, d'emplois de différentes catégories économiques, etc.), l'approche par les seuls automates cellulaires atteint des limites techniques. Du fait de ces limitations, ce type d'approche semble moins adapté pour analyser l'évolution d'un système de villes que pour modéliser l'évolution de l'occupation du sol à l'échelle régionale ou intra-urbaine.

### *L'approche multi-agents*

Les systèmes multi-agents offrent des possibilités de conception intéressante pour la modélisation dynamique des systèmes de villes. Ces méthodes, qui renvoient également aux principes d'auto-organisation sont issues de l'intelligence artificielle distribuée. Elles permettent de développer des types de modélisation dans lesquels l'espace intervient de façon complètement intégrée et de simuler des changements qualitatifs de structure, et en particulier des propriétés émergentes de systèmes complexes. Une des hypothèses de base, stipulant que le jeu des interactions opérant à un niveau inférieur définit des structures cohérentes à un niveau supérieur, est d'un intérêt conceptuel évident en géographie.

La notion d'intelligence artificielle distribuée (IAD) est née au début des années soixante-dix, comme élargissement de l'intelligence artificielle classique. L'IAD a pour objectif d'élaborer des systèmes constitués non plus d'un seul « agent » ou « expert » mais d'un groupe d'agents autonomes, capables d'interagir. Elle conduit à la réalisation de systèmes dits « multi-agents », qui permettent de modéliser le « comportement » d'un ensemble d'entités plus ou moins organisées, selon un ensemble de lois ou de règles (Erceau et Ferber, 1991). Ces systèmes permettent d'incorporer simultanément des règles qualitatives, des équations quantitatives et des propriétés inhérentes aux configurations spatiales. La formalisation par les systèmes multi-agents est centrée sur des mécanismes de communication et de coopération entre des agents qui permettent en particulier d'intégrer les effets des interactions spatiales de manière nuancée. Il s'agit donc d'une approche bien adaptée à la modélisation de l'émergence de nouvelles structures et à l'analyse des phénomènes d'adaptation et d'auto-organisation.

Une approche par les systèmes multi-agents diffère conceptuellement d'une modélisation par un système d'équations différentielles, tant dans l'élaboration du modèle que dans la gestion des données. La notion d'agent est au cœur de cette approche. Il peut être défini comme « une entité réelle ou abstraite qui peut agir sur lui-même et sur son environnement, qui a une représentation partielle de son environnement, et qui peut communiquer avec d'autres agents ; son comportement résulte de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents » (Ferber, 1989 ; 1995).

Dans les applications des systèmes multi-agents, on met sous forme d'agent (réification) toutes les entités collectives ou individuelles qui sont nécessaires au déroulement des simulations. A titre d'exemple, si l'on souhaite modéliser le processus d'embouteillage dans les villes, l'informaticien va définir des agents aussi variés que les « voitures », les agents « piétons » ou encore les agents « feux tricolores », etc. Dans d'autres applications les agents peuvent être de même nature mais définis en fonction de leur niveau de spécialisation. Par exemple, si l'on souhaite simuler le fonctionnement d'une fourmilière, on ne définira que des agents « fourmis » mais de plusieurs types, correspondant aux différentes spécialisations des fourmis. Le plus fréquemment, les agents sont des individus autonomes et mobiles. En

géographie, il peut être intéressant de considérer, à un certain niveau d'abstraction, une entité territoriale, durable et relativement autonome, telle qu'un village ou une ville, comme un « agent », dont la localisation sera donc fixe. Dans notre application, nous définirons donc différents types d'agents correspondant aux différentes spécialisations urbaines.

Ainsi les agents utilisés dans cette modélisation sont des entités spatiales composées d'un ensemble d'acteurs individuels. De tels agents sont immobiles mais ils entretiennent entre eux beaucoup d'interactions qui résultent de mobilités opérant à un niveau inférieur (flux d'individus, de marchandise, d'information). On aurait certes pu appliquer le formalisme à un niveau d'organisation inférieur en considérant, par exemple, les acteurs individuels eux-mêmes comme autant d'entités élémentaires. Cette construction nous a paru trop détaillée par rapport aux objectifs de nos travaux de recherche. Ici, nous cherchons à retrouver les propriétés macroscopiques des systèmes de peuplement, en tant qu'elles résultent des interactions observables à méso-échelle entre les unités constitutives de ces systèmes (chacune des villes). Nous faisons donc l'hypothèse simplificatrice, mais autorisée par de nombreuses études de l'évolution des systèmes de villes, qu'il est pertinent d'admettre chaque lieu de peuplement comme l'unité de base de notre modèle.

La définition donnée aux agents par J. Ferber peut sans difficulté être transférée aux villes :

- Un agent est « une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement ». Dans notre application l'agent est une entité collective et son « comportement » est alors décrit par les modifications des variables habituellement utilisées pour la décrire, à ce niveau d'agrégation. L'agent « agrégat de population » agit sur son environnement en exploitant ses ressources, en implantant des infrastructures, etc. L'effet de cette action dépendra bien sûr de la taille de l'agrégat et de son niveau de fonction. Le système multi-agents permet ainsi de gérer des objets géographiques de nature différente et correspondant à des échelles variées.

- « Un agent a une représentation partielle de son environnement ». Les informations relatives à la fois à l'unité spatiale (potentiel agricole, nombre d'habitants, statut administratif...), aux unités avec lesquelles elle entretient des relations et à ses interactions avec elles (distance, infrastructures...) sont stockées et gérées localement, au niveau de chaque agent, c'est-à-dire, dans le cas de modèles spatiaux, au niveau de chaque entité géographique.

- L'agent peut « dans un univers multi-agents, communiquer avec d'autres agents ». Puisque la gestion de l'information s'effectue localement, la communication est un élément indispensable au fonctionnement du système. Les agents sont capables de recevoir et d'envoyer des informations. C'est par l'intermédiaire de ces mécanismes de communication que seront modélisées les interactions spatiales. Une telle modélisation permet d'intégrer des phénomènes aussi variés que les flux d'information ou les

mécanismes d'offre et de demande économique. La contrainte des distances peut être prise en compte d'une manière extrêmement différenciée par l'introduction de portées différentes selon le statut et le niveau hiérarchique des unités de peuplement considérées. La méthode permet ainsi de modéliser une propriété fondamentale des systèmes urbains, qui est un degré d'ouverture de chaque ville (ou sous-système) variable en fonction du niveau occupé par la ville dans la hiérarchie.

• « *Le comportement d'un agent est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents* ». Les règles qui régissent l'évolution de l'agent sont aussi gérées à l'échelle locale. Ainsi, les règles sont définies globalement mais chaque agent définit sa propre évolution à partir de ses connaissances sur son état et sur le bilan de ses interactions avec les autres. Ce formalisme permet d'envisager la ville comme un système évolutif. Elle reçoit et diffuse des informations, elle peut créer, elle peut innover. Le statut d'une ville peut, par exemple, être modifié : un hameau ou un village peut se transformer progressivement en une ville de niveau de plus en plus élevé et progresser dans la hiérarchie urbaine. Comme elle est en concurrence avec d'autres, elle peut également subir un changement inverse et régresser dans la hiérarchie urbaine.

L'intérêt majeur de ce formalisme est d'associer à chaque type d'agent ou classe d'agent, un ensemble de propriétés et de règles qui définissent ses interactions avec les autres agents. Certaines règles sont communes à l'ensemble des agents ou au contraire ne concernent qu'un type d'agent (ex : ville administrative). Si le contenu des règles relève bien d'une logique globale et obéit à un certain degré de généralité, leur mise en œuvre se fait entièrement à l'échelle de l'unité géographique de base du système étudié. Elle est gérée localement, au niveau de chaque entité, en fonction de son état et des informations dont elle dispose sur ses voisins. Par exemple, au lieu que la forme des interactions spatiales soit fixée par une équation de type gravitaire pour l'ensemble du système, chaque localité possède un voisinage en fonction du type d'activités qu'elle possède, des portées qui y sont associées, de la concurrence des localités voisines ou des obstacles locaux aux échanges.

### Le modèle SimPop

Par analogie avec le nom donné à un programme de simulation du développement urbanistique d'une ville par le jeu des différents acteurs (SIMCITY), nous avons appelé SimPop, notre modèle simulant la genèse et le développement d'un système de villes (Bura *et al.*, 1996 ; Pumain *et al.*, 1995). Ce modèle a été développé en utilisant les techniques spécifiques des langages orientés objet, techniques adaptées à une conception par les systèmes multi-agents.

Le territoire est représenté au moyen d'une grille de 236 hexagones, chacun représentant un lieu potentiel de peuplement. Pour tenir compte de

la configuration physique du territoire, nous avons défini un agent plus général que l'agent « unité de peuplement », l'agent « unité géographique », caractérisé par un ensemble d'attributs comme la position et le voisinage de l'unité. Ces variables indiquent la localisation relative de l'unité géographique et permettent de stocker à tout moment des informations sur l'état de ses voisins. Elles sont particulièrement importantes pour gérer les interactions, au niveau local. Par ailleurs, on a distingué les milieux habitables des milieux plus difficiles à coloniser : haute montagne, marais et mer. Ainsi, certaines unités géographiques sont dès le départ désignées comme ne pouvant pas être peuplées ; elles constituent des obstacles au déplacement. Dans notre application, un fleuve ou des territoires montagneux augmentent la distance entre certains lieux.

L'agent « unité de peuplement » constitue une sous-classe de la classe des agents « unité géographique ». Elle hérite ainsi de ses caractéristiques et est dotée d'une population qui se répartit suivant les différents secteurs d'activité (agriculture, commerce, administration). Seule la population active est prise en compte.

Une unité de peuplement peut acquérir des fonctions lui permettant d'interagir avec son environnement. Il existe deux types d'unités de peuplement dans le modèle SimPop. On distingue les unités qui ne possèdent que la fonction agricole, désignées par les termes « village » ou « hameau » de celles qui, au cours de leur développement, acquièrent des fonctions urbaines et constituent la classe « ville ». Les différents types de fonctions urbaines constituent des sous-classes de la classe « ville » qui possèdent des attributs et des propriétés spécifiques (figure 1).

### *Les ressources naturelles et la population*

Chaque unité géographique est dotée d'un capital de ressources naturelles : ressources agricoles, ressources industrielles, ressources maritimes. Ce capital, appelé aussi potentiel de ressources naturelles est plus ou moins mis en valeur par chaque lieu de peuplement. Ce capital représente la capacité maximale de ressources naturelles et doit être mis en valeur par chaque lieu de peuplement.

Ces ressources naturelles sont réparties sur l'ensemble des cellules de manière aléatoire, selon une loi normale. Le montant des ressources agricoles est fixe sur toute la période de simulation mais leur rendement évolue au cours du temps afin de tenir compte des progrès et innovations techniques. Des ressources industrielles sont exploitables à partir de l'an 1800 ; elles sont attribuées par tirage au hasard de dix lieux et ne sont différenciées que par leur présence ou leur absence.

De la même façon, on définit un semis de peuplement initial en dotant chaque cellule d'une certaine population. Les cellules de type « montagne », « marais » ou « mer » sont considérées comme des zones inhabitables. Le nombre d'habitants des autres cellules est défini de manière aléatoire comme résultat d'une loi normale. Par exemple, dans l'expérience 7

(tableau 1), la population est distribuée selon une loi normale de moyenne 180 habitants, d'écart type 50 habitants.

**Les fonctions économiques**

Les fonctions économiques déterminent l'ensemble des moyens de production qui vont permettre aux agents «ville» de s'enrichir, de subsister et de s'accroître. On distingue quatre types de fonctions : agricole, commerciale

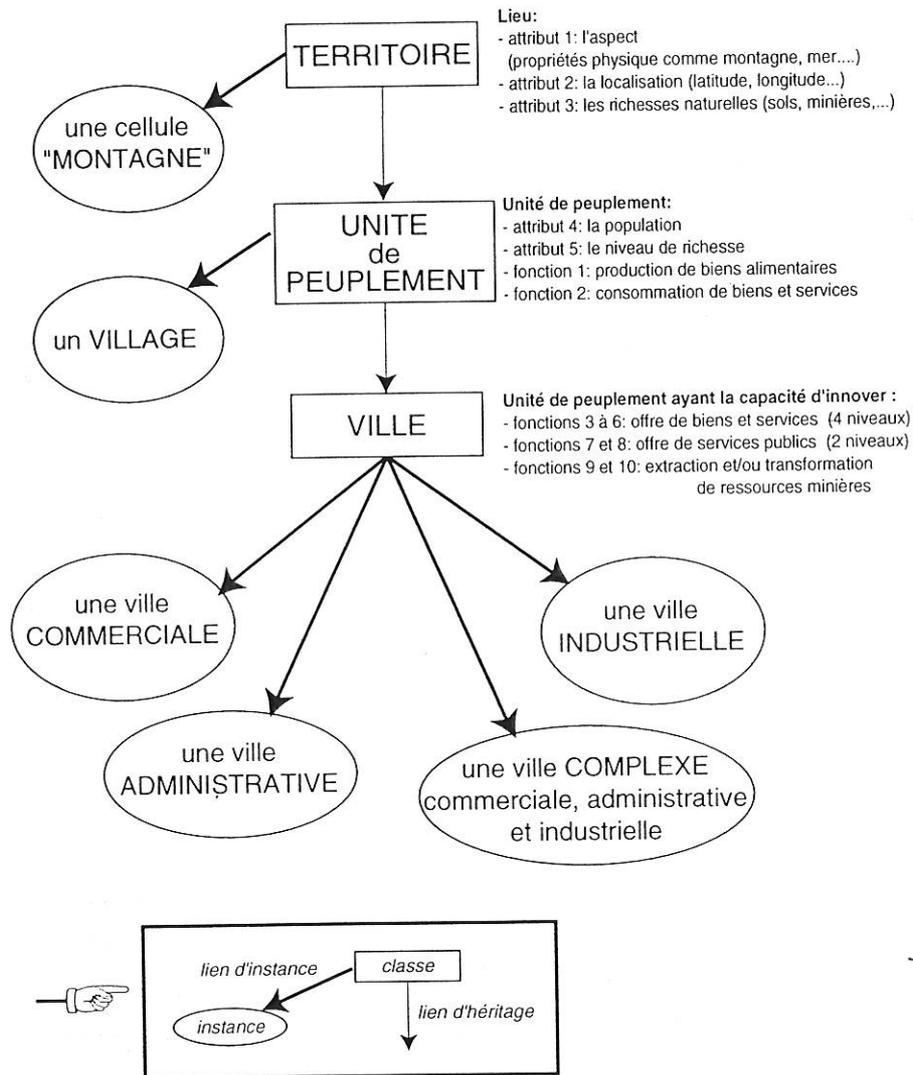


Figure 1.-- Hiérarchie des agents

TABLEAU 1.— EXEMPLE DE SITUATIONS INITIALES

	Distribution de la population	Distribution des ressources agricoles
Expérience 1	N(180,30) <sup>(1)</sup>	non fixée <sup>(2)</sup>
Expérience 7	N(180,100)	idem
Expérience 9	N(180,180)	idem
Expérience 11	idem	N(200,100)
Expérience 12	idem	N(400,200)
Expérience 16	N(180,180)	idem
Expérience 25	N(180,360)	idem
Expérience 26	N(90,90)	idem
Expérience 30	N(180,90)	idem

<sup>(1)</sup> La population est distribuée selon une loi normale de moyenne 180 et d'écart type 30.  
<sup>(2)</sup> Cela signifie que la production n'est pas limitée et dépend uniquement de l'importance de la population du secteur agricole.

avec quatre niveaux, administrative avec deux niveaux et industrielle en deux types (extraction ou transformation). Les fonctions urbaines s'organisent de manière hiérarchique selon les conditions d'acquisition requises, les niveaux de productivité et la portée spatiale des activités économiques.

Chaque niveau de fonction est décrit par un ensemble de paramètres (tableau 2). En premier lieu, une fonction est caractérisée par sa portée spatiale ( $p$ ), définissant pour le lieu la possédant, la zone géographique où elle peut s'exercer. Les portées sont mesurées en termes de contiguïtés. Pour une ville administrative de niveau 1, par exemple, cette zone définit

TABLEAU 2.— PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES FONCTIONS ÉCONOMIQUES

Type de fonctions	Portée spatiale	Production par actif	Demande par habitant	Prix	Impôt prélevé
<i>notation</i>	$p^{(1)}$	$\beta$	$\delta$	$\pi$	
Agricole		$1,01+t*0,005^{(2)}$	1	$(d^{(3)}+1)/2$	10 % $R^{(4)}$
Commerciale 1	1	1,5	0,25	$(d+3)/4$	10 % $R$
Commerciale 2	2	2	0,125	$(d+3)/4$	10 % $R$
Commerciale 3	4	2,5	0,0625	$(d+3)/4$	10 % $R$
Commerciale 4	8	3	0,03125	$(d+3)/4$	10 % $R$
Administrative 1	3	0			30 % $R$
Administrative 2	6	0			0 <sup>(5)</sup>
Industrielle	3	5			10 % $R$

<sup>(1)</sup> Les portées augmentent d'une unité tous les 250 ans, puis tous les 400 ans.  
<sup>(2)</sup> La production s'accroît au cours du temps, pour tenir compte des avancées technologiques.  
<sup>(3)</sup>  $d$  représente la distance entre le lieu de production et le lieu de demande.  
<sup>(4)</sup>  $R$  correspond à la richesse totale du lieu de peuplement.  
<sup>(5)</sup> Les villes administratives de niveau 2 ne sont pas taxées. En revanche, elles prélèvent sur tous les lieux à portée, de 10 % ou de 30 %, pour une ville administrative de niveau 1.

l'ensemble des lieux de peuplement qui, ici localisés à moins de trois unités de la ville, seront assujettis à l'impôt. Ainsi une ville commerçante de niveau 3 pourra échanger des biens et des services avec des lieux habités situés à moins de quatre unités. A chaque niveau de biens et de services sont associés une productivité ( $\beta$ ) et un prix de vente ( $\pi$ ). Par exemple, pour la fonction commerciale de niveau 2, tout actif affecté à la production de ce bien est capable de produire deux unités par cycle ( $\beta=2$ ), tandis que chaque habitant a une demande, fonction de la nécessité du bien ( $\delta=0,125$ ). Un actif est donc potentiellement en mesure de satisfaire la demande de 16 habitants. Les biens sont proposés à l'ensemble des lieux appartenant à la zone géographique définie par la portée associée, à un prix qui est une fonction croissante de la distance au lieu qui le propose.

### Les principales règles de fonctionnement

Chaque niveau de fonction est acquis selon une règle propre qui comporte des critères de taille et de richesse. Le tableau 3 récapitule ces règles. L'acquisition des différentes fonctions commerciales dépend uniquement de la quantité de population du lieu. Les différents niveaux étant ordonnés, il est nécessaire de posséder le niveau de fonction commerciale inférieur, pour acquérir un niveau supérieur. Les fonctions administratives et industrielles s'obtiennent au regard de plusieurs critères. Pour acquérir la fonction administrative de niveau 1, par exemple, une ville doit posséder au moins une fonction commerciale de niveau 2, avoir plus de 500 habitants et avoir accumulé au moins 500 unités de richesse.

Le cas des villes industrielles est un peu différent. Une ville acquiert automatiquement la fonction industrielle de niveau 1, en l'an 1800 de la simulation, si elle possède des ressources dites industrielles (par exemple du charbon ou du fer pour l'industrie lourde). En revanche, la fonction industrielle de niveau 2 correspond aux industries de transformation et est acquise par les villes qui ont accumulé un capital important.

TABLEAU 3.— EXEMPLES DE CRITÈRES D'OBTENTION DES DIFFÉRENTES FONCTIONS

Fonctions	Critères d'obtention
Agricole	Aucun
Commerciale 1	Population supérieure à 200 hab.
Commerciale 2	Posséder com 1 et $P > 250$ hab.
Commerciale 3	Posséder com 2 et $P > 400$ hab.
Commerciale 4	Posséder com 3 et $P > 750$ hab.
Administrative 1	Posséder au moins com2, $P > 500$ hab. et $R > 500^{(1)}$
Administrative 2	Posséder adm 1 et $P > 1000$ hab. et $R > 1000^{(1)}$
Industrielle 1	Posséder des ressources industrielles $K > 0$
Industrielle 2	Richesse ( $t$ ) / Richesse totale $> k(t)^{(2)}$

Notation :  $P$  désigne la population,  $R$ , la richesse et  $K$  les ressources industrielles.  
<sup>(1)</sup> A condition que sa zone d'influence n'empiète pas sur celle d'une ville administrative déjà existante.  
<sup>(2)</sup>  $k(t)$  est un paramètre évoluant dans le temps :  $k(t) = 0,1 - (an - 1800) / 1000$ .

Les différentes fonctions ne sont pas exclusives. Selon le type de fonction, le passage d'un niveau à l'autre doit se comprendre différemment. Les niveaux de la fonction commerciale s'acquièrent successivement et se complètent. Les règles associées aux différents niveaux ne sont pas nécessairement du même ordre. Une ville obtenant la fonction commerciale de niveau 2 ne perd pas sa qualité de ville commerciale de niveau 1, tant qu'une partie de sa population reste affectée à ce type de production, et cela reste valable pour les niveaux supérieurs. Il en est de même pour les 2 niveaux de la fonction administrative. Par contre, les fonctions industrielles, associées à deux types de production différents, sont exclusives.

#### *Division du travail*

A la situation initiale, chaque lieu est un village. Toute la population  $P$  de ce village est agricole ( $P_a = P$ ). Par la suite, la population  $P$  d'un lieu se décompose selon les différents secteurs d'activités que ses fonctions économiques lui confèrent. On notera ainsi  $P_f$  la population affectée à l'activité liée à la fonction  $f$  (où  $f$  peut être commerciale de niveau 1, 2, 3 ou 4, administrative de niveau 1 ou 2, industrielle de type 1 ou 2). On a la relation  $P = \sum P_f$ .

Chaque fois qu'un lieu acquiert une nouvelle fonction, une part constante de la population est rattachée à cette nouvelle fonction, par un transfert d'une même part de chaque sous-population, le long de la hiérarchie des activités. Les parts de population affectées à l'acquisition d'une nouvelle fonction varient selon la fonction et au cours du temps. Pour les secteurs commerciaux ne connaissant pas d'inventures, la croissance du secteur concerné est positive, sinon le secteur est pénalisé. Pour les fonctions administratives et industrielles, la part de population affectée à chacune des activités est fixe.

#### *Échanges de biens et services*

Pendant chaque période, la population agricole ( $P_a$ ) est capable de transformer tout ou partie du capital agricole ( $K_a$ ), avec une productivité ( $\beta_a$ ). Cette productivité augmente au cours du temps, ainsi que le rendement de la terre ( $\gamma_a$ ), suivant les innovations techniques. La production agricole est donc fonction de la part de population qui est affectée à cette activité et est limitée par le rendement de la terre. Ainsi, la production de biens alimentaires, ici équivalente au revenu agricole ( $R_a$ ) s'écrit :

$$R_a = \min(\beta_a * P_a ; \gamma_a * K_a)$$

Pendant la même période chaque individu pour assurer sa subsistance doit consommer  $\delta_a$  unités de biens alimentaires. La demande  $D_a$  d'un lieu en biens alimentaires s'écrit :

$$D_a = \delta_a * P$$

La quantité  $R_a - D_a$  représente :

— si elle est positive, le surplus de biens alimentaires que le lieu pourra ensuite proposer aux autres lieux ;

— si elle est négative, la quantité de biens alimentaires qu'elle devra demander aux lieux à sa portée, ayant un excédent de production, pour assurer au moins sa propre subsistance.

Ce mécanisme s'applique de la même façon à toutes les fonctions commerciales et industrielles. Les fonctions administratives sont aussi créatrices de richesse, sous forme d'une « production » en termes de taxes ou d'impôts. Ainsi pour chaque lieu et chaque niveau de fonction  $f$  possédé par ce lieu, sont évaluées simultanément la production  $\beta_f * P_f$  et la demande de la population associée à ces biens ou services  $D_f = \delta_f * P$ . La production constitue l'offre  $O_f$ .

Au début de chaque cycle de simulation, c'est d'abord la demande exprimée par les habitants du lieu même qui est satisfaite par les biens produits localement. L'offre en biens  $f$  est donc d'abord diminuée par la quantité de demande locale. Les demandes et les offres sont ensuite évaluées par niveau de fonction. Certains lieux peuvent avoir des demandes positives pour un type de biens et des invendus pour d'autres biens. Un marché d'échange entre les lieux se met alors en place, selon des réseaux définis par la plus grande des portées associées aux fonctions possédées par les lieux. Les lieux « demandeurs » envoient des messages aux lieux « d'offre » en fonction de leur capacité de financement. Ces derniers répartissent leur offre au prorata des populations des lieux et en quantité inversement proportionnelle à leur éloignement. Chaque échange donne lieu à un transfert de richesse, fonction du prix des biens échangés, du lieu demandeur vers le lieu offrant.

Ces opérations se renouvellent jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'échanges possibles. En fin de période (cycle de dix ans) le taux de variation de la population de chaque lieu est évalué selon le bilan de la période en cours et les fonctions qu'il possède.

#### *Croissance de la population*

Le calcul de la variation de la population, en fin de cycle, se fait en fonction de plusieurs critères hiérarchisés. Il incorpore trois principes : si la production en biens alimentaires est insuffisante, et si ces biens ne peuvent pas être acquis pour satisfaire la demande, la croissance de la population est menacée. Ce principe « malthusien » tient compte des contraintes que l'environnement, avec ses aléas climatiques par exemple, a exercé sur le développement des populations pendant de nombreux siècles jusqu'à la révolution industrielle. La croissance des villes est supposée être en relation avec le niveau des fonctions possédées. Celles-ci leur donne la possibilité de dépasser les capacités locales grâce à un accroissement de la portée des activités.

Par ailleurs, l'enrichissement d'un lieu joue sur sa capacité à croître. L'enrichissement est le rapport entre la richesse accumulée pendant la période

en cours, et celle accumulée pendant la période précédente ( $R_t/R_{t-1}$ ). Dans ce cas, on accroît le taux de variation d'une valeur proportionnelle à la part de richesse accumulée pendant la période. De la même façon on prend en compte les résultats des ventes des différents secteurs de production. Ainsi on mesure à partir d'un rapport d'échange théorique (rapport entre la population de la zone géographique à portée d'une ville et sa population), l'adéquation entre l'offre potentielle du lieu, et la demande potentielle des lieux à sa portée. Si une ville ne peut satisfaire toute la demande exprimée par les lieux à sa portée, son taux de variation est pénalisé.

Enfin, le voisinage d'une ville, s'il est bénéfique à la production agricole des villages environnants, grâce à la diffusion des progrès techniques, peut entraîner un exode rural précoce du fait de l'attraction exercée par les métiers et le milieu urbain.

Les taux de variation des unités de peuplement qui ne possèdent qu'une activité agricole sont fonction de leur localisation : un village proche d'une ville aura une plus grande probabilité de voir sa population décroître en raison du pouvoir attractif de la ville. En revanche, un village éloigné d'une ville, aura au contraire une plus grande probabilité de voir s'accroître sa population.

Quelle que soit la taille de l'unité de peuplement et sa localisation relative, le taux de variation de sa population est le résultat d'une variable aléatoire. Dans la théorie urbaine, cela signifie que les causes susceptibles de faire croître la population d'un lieu sont multiples, de nature extrêmement variée et imprévisible, difficilement identifiables à cette échelle. Sur le moyen terme, elles se traduisent par une tendance centrale assortie de variations assez considérables (Gibrat, 1931).

Il serait fastidieux de détailler ici l'ensemble des règles utilisées dans les simulations. En revanche, pour une bonne compréhension du modèle, nous avons récapitulé, de manière générique sur l'ensemble de la période, les différentes étapes qui se succèdent au cours d'un cycle de simulation (figure 2).

Selon les valeurs fixées pour les paramètres et les règles locales de fonctionnement, on peut produire des systèmes de villes dont la structure et l'évolution globales sont susceptibles de varier considérablement. La recherche de systèmes plausibles et le test de certaines hypothèses issues de la théorie urbaine ont été menés grâce à une série de trente simulations.

### Résultat des simulations

Les expériences menées avec le modèle ont consisté à confronter le choix des valeurs d'un certain nombre de paramètres et la formulation des règles avec les descripteurs synthétiques obtenus pour le système des villes simulé. Une série d'expériences a ainsi été réalisée avec une complexification progressive du modèle permettant d'introduire de nouvelles fonctions urbaines.

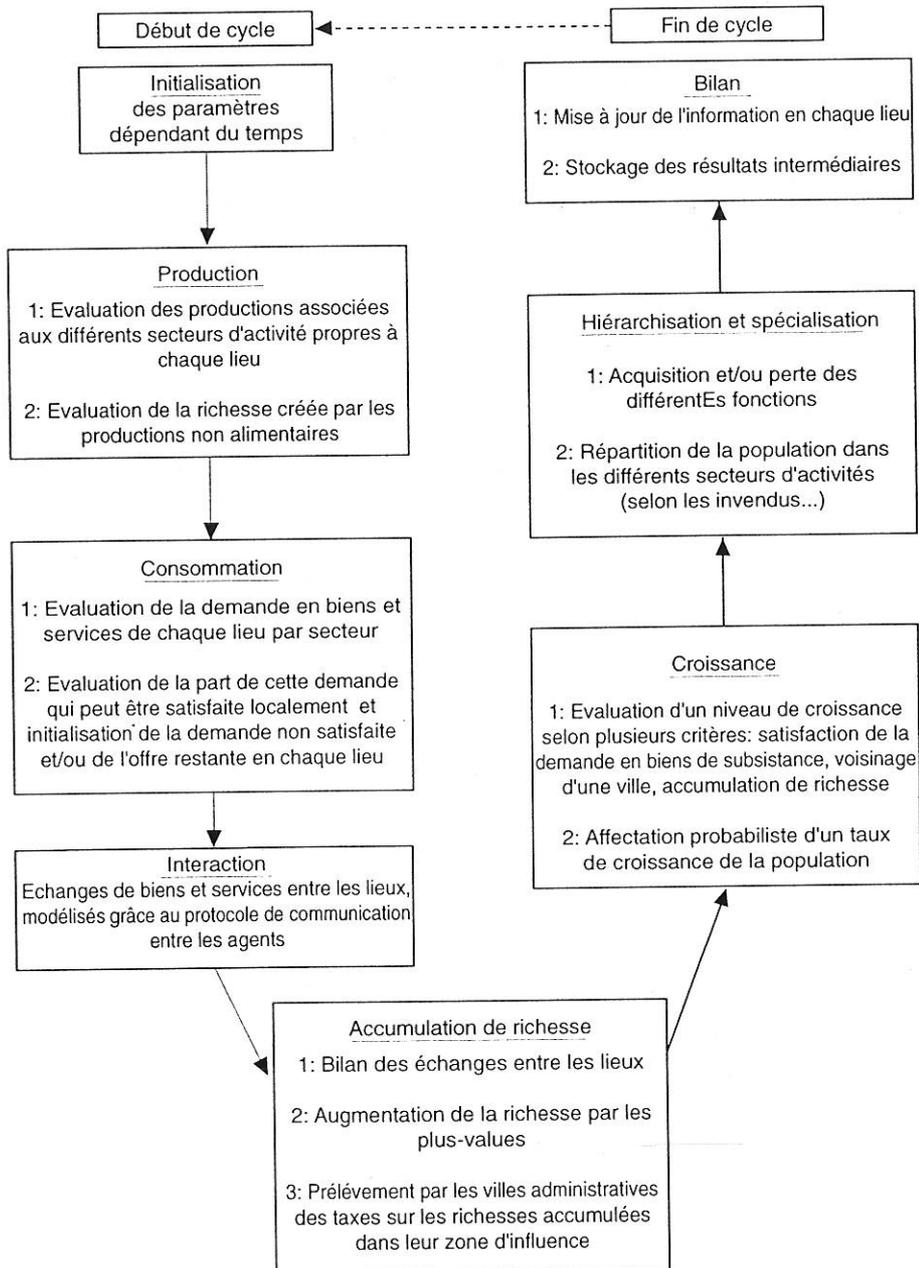


Figure 2.-- Déroulement d'un cycle de simulation du modèle SimPop

Du point de vue de la théorie économique, le modèle SimPop n'est pas un modèle d'équilibre, qui satisferait une quelconque contrainte d'optimisation. Les hypothèses de la théorie économique qui sont introduites sont plutôt de type physiocratique, puis ricardien. On suppose qu'un surplus de production agricole est un préalable nécessaire au développement des villes, et on subordonne le développement ultérieur des villes à l'acquisition de nouvelles fonctions, c'est-à-dire à leur capacité de produire et de prélever un surplus qui permette la poursuite de la croissance urbaine.

Le modèle intègre donc l'effet de contraintes, comme par exemple le fait que la consommation ne puisse excéder la production, et que la croissance de la population ne puisse se faire que si un surplus de richesse est disponible. Mais le modèle ne comporte pas d'équations qui permettraient de mettre en relation *a priori* les valeurs des paramètres et les caractéristiques de la structure du système de peuplement obtenu. C'est au contraire un modèle d'auto-organisation, dans lequel les interactions locales produisent éventuellement une structure, sans que celle-ci puisse être déterminée *a priori* par des équations comptables.

La cohérence des résultats est vérifiée *a posteriori* par l'adéquation de la forme du système simulé et de sa trajectoire avec les résultats d'observations empiriques antérieures. Cette cohérence ne peut cependant s'établir pour n'importe quelle combinaison de valeurs des paramètres. C'est par tâtonnements successifs que le modèle permet d'élaborer progressivement des jeux de paramètres avec des intervalles de variation qui produisent

TABLEAU 4.- RÉCAPITULATION DES DIFFÉRENTS JEUX DE PARAMÈTRES

Critère	Formation générale	Domaine de variation des paramètres du modèle
Répartition des populations initiales	$\sim N(P, \sigma p)$	$P \in \{180; 90; 360\}^{(1)}$ $\sigma p \in \{180; 90; 360\}$
Répartition des ressources agricoles initiales	$\sim N(R_a, \sigma R_a)$	$R_a \in \{200; 400\}$ $\sigma R_a \in \{100; 200\}$
Acquisition de la première fonction commerciale	$P > Sp_1$	$Sp_1 \in \{200; 400; 800; 1600; 1000\}$
Acquisition de la deuxième fonction commerciale	Posséder com 1 et $P > Sp_2$	$Sp_2 \in \{250; 600; 1200; 2400; 1500\}$
Acquisition de la troisième fonction commerciale	Posséder com 2 et $P > Sp_3$	$Sp_3 \in \{400; 800; 1600; 3200; 2000\}$
Acquisition de la quatrième fonction commerciale	Posséder com 3 et $P > Sp_4$	$Sp_4 \in \{750; 1000; 2000; 5000; 3500\}$
Acquisition de la première fonction administrative	Posséder au moins com 2. $P > Sp_5$ et $R > SR_1$	$Sp_5 \in \{500; 1500\}$ $SR_1 \in \{500\}$
Acquisition de la deuxième fonction administrative	Posséder adm 1. $P > Sp_6$ et $R > SR_2$	$Sp_6 \in \{1000; 3000\}$ $SR_2 \in \{1000\}$
Notation : $P$ désigne la population, $Sp$ , un seuil de population, $R$ , la richesse et $SR$ , un seuil de richesse.		
<sup>(1)</sup> On indique les valeurs prises dans les simulations.		

les effets attendus (tableau 4). Ces ensembles de valeurs décrivent des conditions possibles pour une reproduction correcte de l'évolution urbaine, sans qu'il soit possible toutefois de déterminer si la solution qu'ils représentent est nécessaire et suffisante.

Afin d'être en mesure de caractériser les spécificités d'un système de peuplement et de son évolution, un certain nombre de critères macrogéographiques ont été développés. Une procédure de stockage de l'information permet de conserver divers indicateurs globaux à la fin de chaque cycle de simulation. Certains de ces indicateurs représentent de simples bilans dont il est utile d'analyser les évolutions au cours du temps.

Les quantités de population et de richesse totales mesurent ainsi le niveau de développement du système. Après une période de décollage lent, dont la durée varie en fonction des valeurs des paramètres et du degré de concentration initiale de la population, la croissance du système tend à s'accélérer (figure 3). La comparaison des situations finales de différentes simulations a montré que la population, en fin de simulation, est d'autant plus grande que la situation initiale est contrastée et présente, dès le début, des concentrations locales. Le degré de hiérarchisation apparaît ainsi comme un moteur du développement du système de peuplement. Les taux de variation de la population totale du système précisent le rythme de ce développement et la plupart des simulations reproduisent des fluctuations inter-périodes marquées, reflétant l'importance de l'aléa dans une tendance générale à la croissance (figure 4). La proportion de population employée par les différents secteurs d'activité exprime la transition progressive d'une économie agricole à une économie industrielle et tertiaire.

D'autres indicateurs permettent de mesurer la structuration du système de peuplement en termes de hiérarchie et d'organisation spatiale. Il importe en effet que le modèle soit capable de reproduire à la fois la forme de la

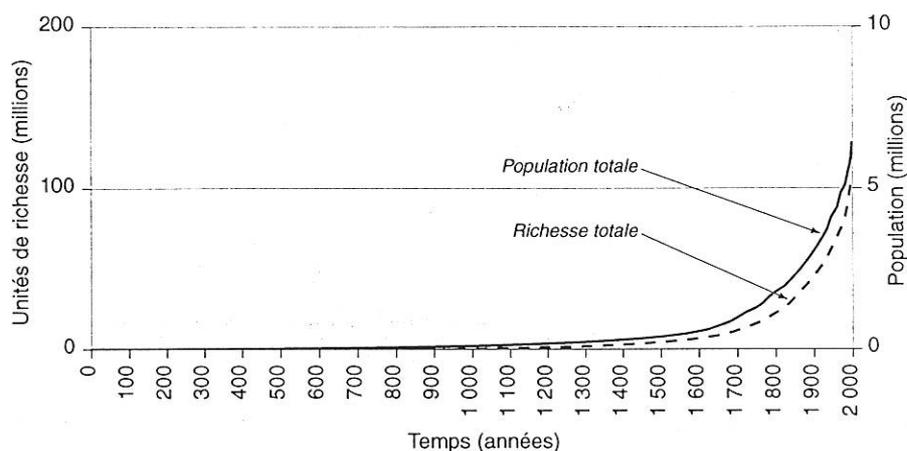


Figure 3.— Mesure de développement du système

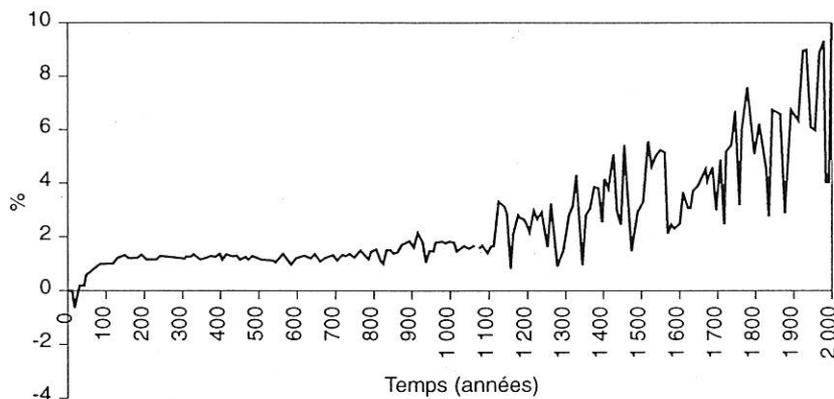


Figure 4.-- Croissance moyenne de la population (% par tranche de 10 ans)

distribution statistique des populations, une certaine forme d'organisation dans l'espace tendant à espacer les unes des autres les plus grandes villes du système et enfin une forme de dynamique traduisant un processus d'agglomération des populations et débouchant sur une augmentation de la concentration de la population au cours du temps.

La forme de la distribution de la taille (population) des unités de peuplement reflète l'organisation hiérarchique du système. Une représentation graphique à deux échelles logarithmiques, avec en abscisse le rang des villes et en ordonnée leur population permet d'observer sommairement la forme de la distribution rang-taille. Si la population des villes varie selon une progression géométrique, la relation entre le logarithme du rang et le logarithme de la taille des villes apparaît sous forme de droite. La pente de la courbe s'accroît généralement au cours du temps, illustrant la hiérarchisation progressive du système (figure 5). Le degré de hiérarchisation atteint à une période donnée peut être mesuré par la pente de la droite d'ajustement. L'évolution de cette valeur, au cours du temps permet d'analyser le rythme du processus de hiérarchisation, de repérer les « sauts » qui accompagnent le début d'un processus de transition et de situer et d'analyser les durées des périodes de stabilité du système de peuplement. Les écarts à un ajustement linéaire traduisent des spécificités du processus de croissance : corrélation entre le taux de croissance et la population des villes, autocorrélation temporelle des taux (Guérin-Pace, 1995). Ce type de représentation est utile pour la comparaison et permet de tester les effets d'un changement de règle, d'une modification de la valeur d'un paramètre ou des conditions de la situation initiale.

Les graphiques rang-taille des simulations montrent tous un infléchissement de la distribution lorsque l'on atteint des seuils de population faibles et la forme de la distribution s'éloigne ainsi progressivement d'une droite.

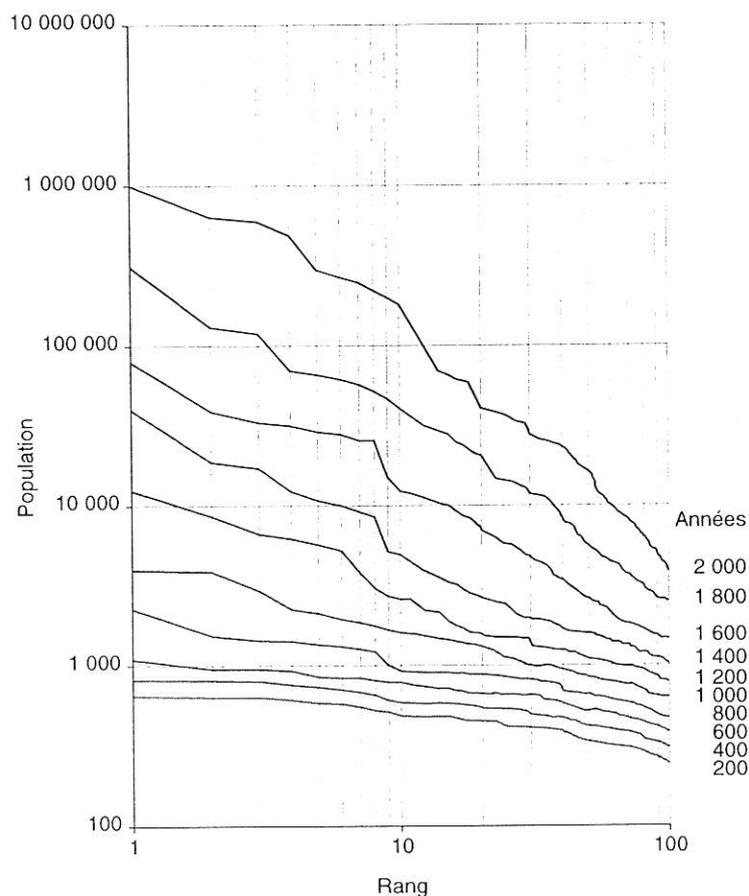


Figure 5.— Distribution rang-taille des lieux de peuplement

La distribution lognormale peut être considérée comme une approximation de la distribution rang-taille de l'ensemble des agrégats de peuplement. Si l'on s'intéresse à la portion haute de la distribution qui est généralement linéaire, on utilise plus volontiers un ajustement à une distribution de Pareto qui possède une formulation plus simple. C'est pourquoi nous n'avons retenu que les cent premières villes pour calculer la pente de la droite d'ajustement. La figure 6 illustre ainsi trois processus de hiérarchisation de nature différente; le premier exemple (a) est caractérisé par une hiérarchisation tardive, avec un processus démarrant-seulement au XIII<sup>e</sup> siècle alors que, dans le second exemple (b) ce processus démarre dès le VII<sup>e</sup> siècle et aboutit en 2000 à une hiérarchisation nettement plus poussée. Le troisième exemple (c) met en évidence une période de transition durant laquelle la hiérarchisation du système se forme entre deux périodes de stabilité.

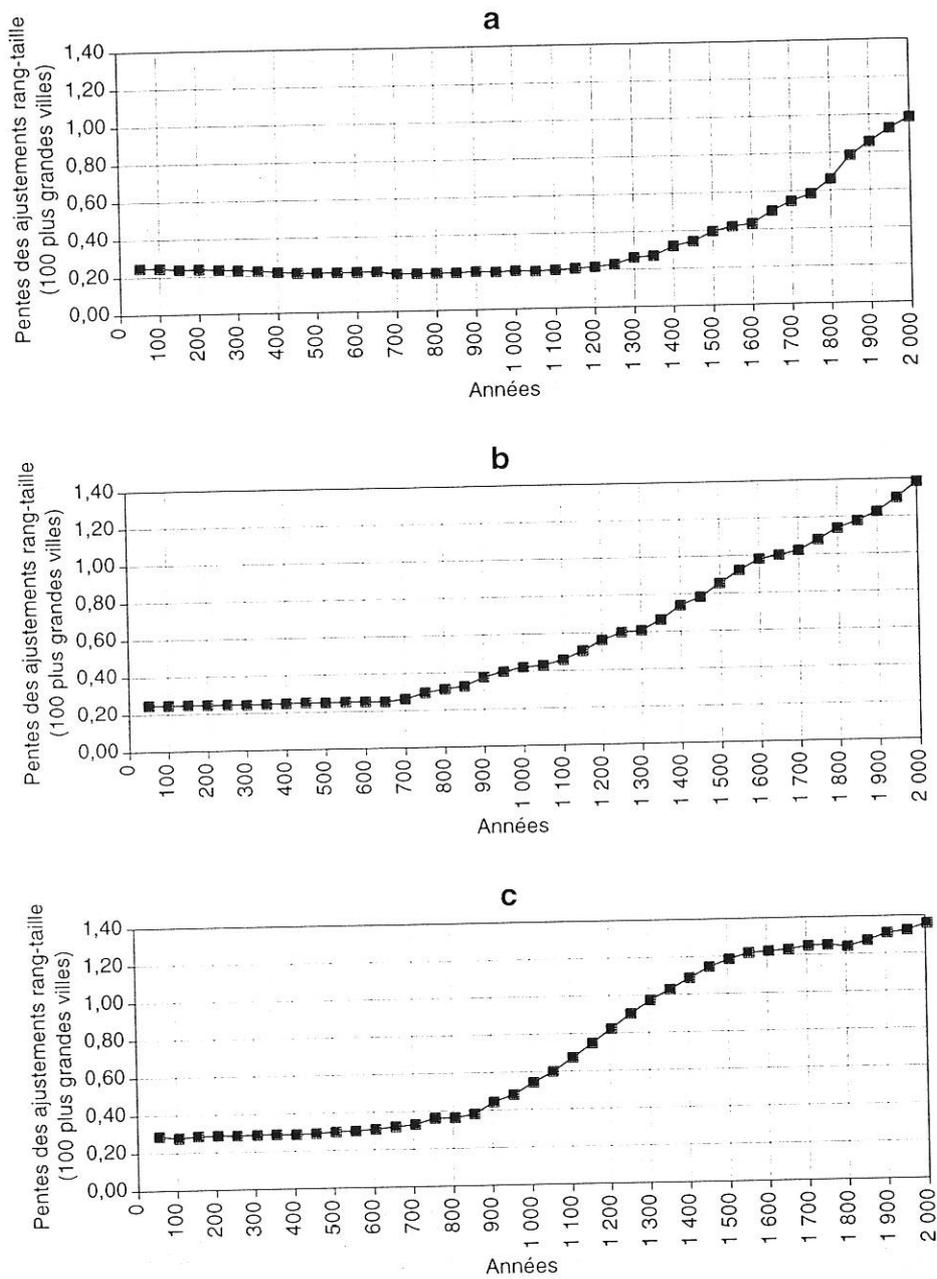


Figure 6.-- Exemple de processus de hiérarchisation

La hiérarchisation du système en termes de répartition de la population s'accompagne en général d'une diversification des fonctions des unités de niveau supérieur. La figure 7, représentant l'évolution du nombre de villes selon leur niveau de fonction, montre un exemple de simulation où l'on observe clairement comment les fonctions de base se banalisent et sont acquises par un nombre de lieux de plus en plus important alors que de nouvelles fonctions de niveau supérieur apparaissent beaucoup plus tardivement.

Des indicateurs spécifiquement spatiaux tels que l'espacement moyen entre des lieux de même niveau de fonction permettent de caractériser l'évolution de la structure spatiale du système. La figure 8 illustre une situation

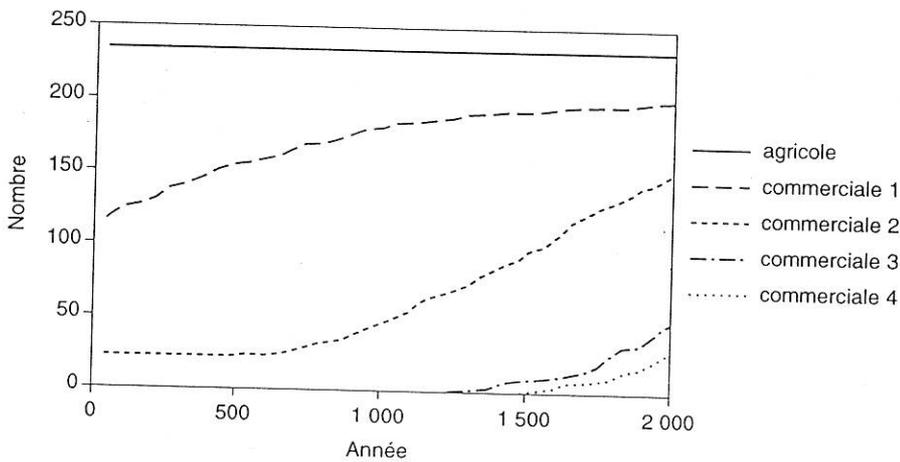


Figure 7.-- Nombre de villes par fonction

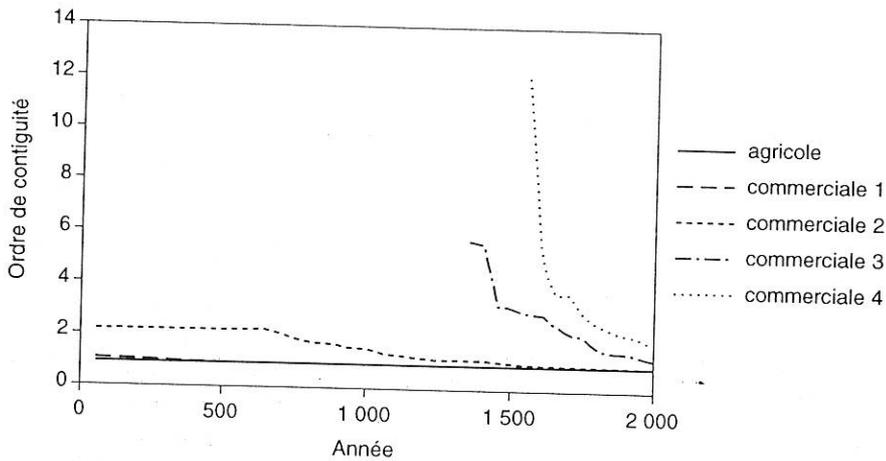


Figure 8.-- Distances moyennes entre lieux par fonction

récurrente dans de nombreuses simulations : l'espacement entre deux lieux de même niveau de fonction est d'autant plus important que ce niveau est élevé et, avec la banalisation et la diffusion des fonctions, ces distances tendent à diminuer progressivement. De telles mesures seront utilisées par la suite pour mesurer le degré d'adéquation entre la forme de la répartition spatiale simulée des lieux en fonction de leur niveau dans la hiérarchie, et l'organisation spatiale correspondant d'une part à différentes réalités observées, d'autre part à un modèle théorique de places centrales (Christaller, 1933). Enfin, l'organisation spatiale du système de peuplement produite par une simulation est caractérisée par une représentation cartographique des lieux, de leur taille et de leur fonction (figure 9).

Différentes combinaisons de répartitions des ressources naturelles et de répartition de la population ont permis de tester la sensibilité du modèle aux conditions initiales. On a observé par exemple l'influence de configurations initiales plus ou moins hiérarchisées, sur la dynamique de peuplement. D'une manière générale, les variations de condition initiale ont peu d'effet sur l'évolution de l'ensemble du système. Toutefois, plus les quantités initiales sont grandes, plus rapide est l'urbanisation. Par ailleurs, plus les contrastes sont importants dans les distributions initiales de population et de ressources et plus la différenciation des unités géographiques dans le système est grande.

L'ensemble de ces simulations montre clairement le rôle fondamental de trois composantes pour obtenir un système de peuplement qui se développe et se complexifie progressivement au cours du temps, avec une hiérarchisation croissante. Ces composantes sont complémentaires et réfèrent à différentes échelles géographiques :

- La capacité de certains lieux à dégager un surplus économique : si l'ensemble des lieux de peuplement sont très homogènes à la fois du point de vue de leur population, de leur potentialité de croissance et de leur rythme de reproduction, non seulement le système ne se hiérarchise pas, mais de plus il tend rapidement vers une stagnation globale. Les simulations montrent ainsi le rôle capital d'une dynamique de différenciation dans la croissance même du système. Pour que le système se développe, il est absolument nécessaire d'introduire une force de différenciation à une échelle locale. Cela peut être obtenu, soit en partant d'une répartition initiale hétérogène, soit en affectant la distribution des taux de variation d'un écart type suffisamment élevé pour réduire le caractère déterministe de la croissance, soit en introduisant des contraintes sous forme de règles afin de freiner le développement de certains lieux, par exemple ceux localisés à côté d'une ville.

- Le jeu des interactions et surtout des compétitions au niveau régional : si la capacité à dégager un surplus agricole est suffisante pour que certains agrégats accèdent au rang de villes de premier niveau, c'est-à-dire exerçant des activités commerciales de niveau banal, il faut des mécanismes plus complexes pour que le système continue à se hiérarchiser. Le protocole de communication, propre aux systèmes multi-agents, permet en effet de

reproduire des mécanismes de compétition et de concurrence entre les villes qui stimulent la différenciation entre les lieux et contribuent à faire progresser la hiérarchisation du système. Sans règles relatives à ces interactions, le système tend à stagner et à produire un système de villes peu

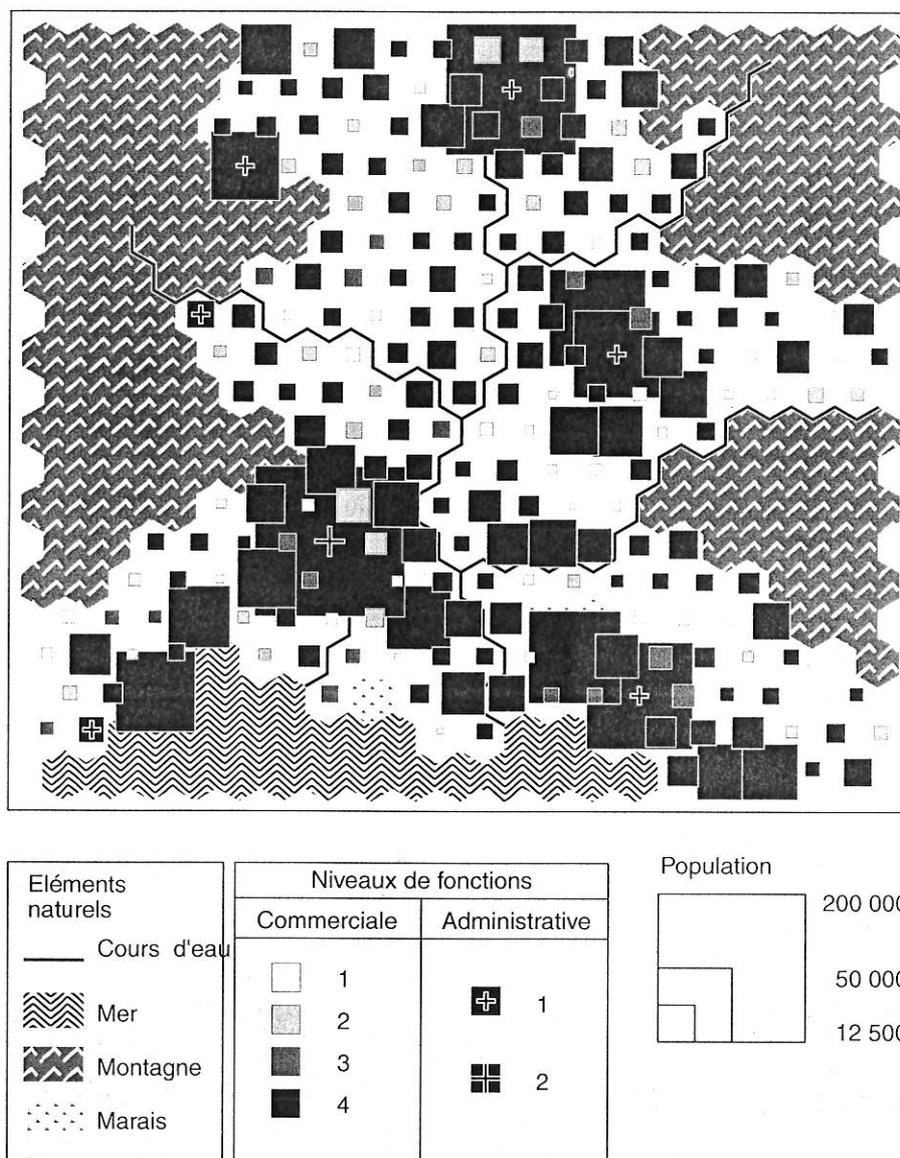


Figure 9.- Exemple de sortie cartographique du modèle SimPop

spécialisées et de taille assez comparable. Ces règles jouent à un niveau infra-régional, à l'échelle des portées des villes.

- La capacité du système à s'adapter à de nouvelles innovations qui créent de nouvelles fonctions dans les villes : de nombreuses simulations intégrant seulement des règles relatives aux deux points précédents ont été effectuées. Au-delà d'une certaine variété dans les résultats des simulations en fonction des valeurs des paramètres et des conditions initiales, on a observé une constante qui est la stabilisation du système à partir d'une certaine date, se situant en général entre le XV<sup>e</sup> et le XVIII<sup>e</sup> siècle. La taille de la population totale du système, comme son degré de hiérarchisation, tend à stagner. Seule l'introduction de l'industrie en 1800, correspondant à une innovation essentielle, permet de maintenir la croissance du système tout au long de la simulation.

Les mécanismes décrits à ces trois niveaux relèvent d'une même logique d'adaptation aux innovations dont la nature et la modélisation varient au cours du temps. Alors que le premier « décollage » du système est dû à l'accumulation de surplus agricole, les innovations associées aux différents niveaux de fonctions stimulent le développement du système. La modélisation de la diffusion de nouvelles technologies sur l'ensemble du système urbain, introduites suivant un axe de temps exogène au modèle, permet de maintenir et relancer la dynamique de hiérarchisation. Le degré d'endogénéisation des mécanismes de diffusion et d'adoption des innovations dans la modélisation varie suivant les périodes et le type d'innovation. Par exemple, les valeurs des portées des villes sont actuellement liées aux fonctions économiques. Elles pourraient être paramétrées en fonction de la place des villes dans la hiérarchie du système, de sorte que la détermination des portées serait gérée de manière entièrement endogène dans le modèle. Les simulations montrent que seule une prise en compte de l'ensemble de ces mécanismes permet de simuler un développement durable du système sur l'ensemble de la période, soit 2000 ans.

### Conclusion

La conception informatique des systèmes multi-agents a montré son efficacité pour des modélisations intégrant des considérations qualitatives aussi bien que quantitatives. La souplesse de la formalisation permet une élaboration progressive du modèle. La construction s'effectue avec une incorporation interactive de connaissances, tant par l'introduction de nouveaux types d'agents ou de nouvelles règles que par des modifications de paramètres, ou par des changements de présentation des résultats de simulation. Une telle souplesse est un grand avantage pour la modélisation en sciences humaines, dans laquelle l'ensemble des facteurs et des objets à prendre en compte pour modéliser un système n'est pas nécessairement connu *a priori* et peut être difficile à écrire sous forme d'équation, du fait de la spécificité des interactions spatiales.

La grande innovation qui a été rendue possible par la souplesse de la méthode multi-agents est la prise en compte, dans un même système, de plusieurs formes d'interaction spatiale, avec des portées variables. Ces propriétés ont permis de progresser dans le domaine délicat de la modélisation des interactions spatiales, qui sont au cœur des effets spécifiques que les géographes tentent de formaliser.

Comme tout modèle de simulation, SimPop a des limites inhérentes au statut de celle-ci. L'absence de solution analytique empêche d'acquérir la certitude que les paramètres utilisés représentent l'unique moyen de produire la situation finale souhaitée. C'est en ce sens un outil heuristique plutôt qu'un instrument qui permettrait de tester des hypothèses. Cette approche relativement concrète du fonctionnement provient de la possibilité de définir toutes les règles au niveau local. En revanche, il est sans doute plus difficile avec SimPop, en particulier dans les versions plus complexes du modèle, de bien mesurer l'effet sur l'évolution de tel ou tel paramètre. On rencontre dans cette opération non seulement la difficulté, partagée avec les modèles d'équations différentielles, de la non-linéarité des effets de la plupart des paramètres dans ces systèmes complexes. Il n'est pas toujours aisé de définir quel est l'attracteur vers lequel la dynamique entraîne le système lorsque celle-ci est produite à partir d'un très grand nombre d'interactions élémentaires, assorties de fluctuations stochastiques et d'effets non linéaires. Une solution qui permettrait de mieux identifier l'attracteur consisterait à se rapprocher des conditions définies par des modèles dynamiques dont la convergence vers un attracteur compatible avec les propriétés macroscopiques du système (par exemple, la loi rang-taille) a déjà été démontrée (Pumain et Haag, 1994).

En dépit, ou à cause, de cette complexité, n'importe quel jeu de valeurs de paramètres n'est pas susceptible d'engendrer une évolution du système de peuplement qui soit compatible avec les observations. Il est nécessaire de respecter certaines cohérences dans les règles qui sont introduites pour simuler la croissance d'un système de villes hiérarchisé et dont le développement soit durable. Cette obligation de cohérence fait du modèle un outil pédagogique intéressant pour l'apprentissage interactif de la dynamique urbaine.

## BIBLIOGRAPHIE

- Allen, P., Sanglier, M. (1979), A dynamic model of growth in a central place system, *Geographical Analysis* : 256-272.
- Bairoch, P. (1985), *De Jericho à Mexico, villes et économie dans l'histoire*, Paris, Gallimard.
- Baker, A.R.H. (1969), Reversal of the rank-size rule : Some nineteenth century rural settlement sizes in France, *The Professional Geographer*, n°6, pp. 386-392.
- Bura, S., Guérin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D., Sanders, L., (1996), Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system, *Geographical Analysis*, vol. 28, n°2.
- Chevalier, M. (1832) Le système de la Méditerranée, *Le Globe*.
- Christaller, W. (1933), *Die Zentralen Orte in Süddeutschland*, Jena, Fischer.
- Couclelis, H. (1985), Cellular worlds, a framework for modelling micro-macro dynamics, *Environment and Planning A*, 17, 5 : 585-596.
- De Vries, J. (1984), *European urbanization, 1500-1800*, London and Cambridge, Mass., Methuen.
- Duby, G. (1984), *Histoire de la France urbaine*, Paris, le Seuil, 4 vol.
- Erceau, J., Ferber, J. (1991), L'intelligence artificielle distribuée, *La Recherche*, n°233, volume 22.
- Ferber, J. (1989), *Objets et agents : une étude des structures de représentation et de communication en Intelligence Artificielle*, Thèse d'Etat, Université Paris VI.
- Ferber, J. (1995), *Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective*, Inter Editions, Paris.
- Fletcher, R. (1986), Settlement in archaeology : world-wide comparison, *World Archaeology*, 18, 1, 59-83.
- Gibrat, R. (1831), *Les inégalités économiques*, Paris, Sirey, 296 p.
- Guérin-Pace, F. (1991), Quelques aspects de la répartition spatiale de la croissance des unités urbaines françaises entre 1831 et 1982, in : *Spatial analysis and population dynamics*, Congresses and Colloquia, John Libbey, Ined : 311-320.
- Guérin-Pace, F. (1993), *Deux siècles de croissance urbaine*, Paris, Anthropos, Economica, 205 p.
- Guérin-Pace, F. (1995), Rank-Size Distribution and the Process of Urban Growth, *Urban Studies*, Vol. 32, N°3, (1995), 551-562.
- Janelle, D.G. (1969), Spatial Reorganization : a Model and Concept, *Annals of the Association of American Geographers*, pp. 348-368.
- Juillard, E. (1972), Espace et temps dans l'évolution des cadres régionaux, in: *Études de Géographie tropicale offertes à P. Gourou*, Paris, Mouton, pp. 29-43.
- King, L.J. (1961), A Multivariate Analysis of the Spacing of Urban Settlements in the US, *Annals of the Association of American Geographers*, pp. 223-233.
- Lepetit, B. (1988), *Les villes dans la France moderne*, Paris, Albin Michel.
- Pumain, D. (1982), *La dynamique des villes*, Economica, 231 p.
- Pumain, D. (1984), L'évolution séculaire de la trame urbaine, in : *Géoscopie de la France*, Quant T. (ed.), Paris, Minard, 153-174.

- Pumain, D. (1991), Settlement size dynamics in history, Stockholm, Communication to the 7th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography.
- Pumain, D. Haag, G. (1994), Spatial patterns of urban systems and multifractality in: *Evolution of Natural Structures*, Stuttgart, Mitteilungendes SFB 230, Heft 9 : 243-252.
- Pumain, D., Sanders, L., Mathian, H., Guérin-Pace, F., Bura, S. (1995), SimPop : a multi-agents model for urban transition, in: *Recent developments in spatial information modelling and processing*, Fischer, M., Sikos, T.T., Bassa, L. (eds.), Budapest, Geomarket : 71-85.
- Roy, Snickars (1995), City life : a study of cellular automata in urban growth and dynamics, in: *Spatial analytical perspectives on GIS into environmental and socio-economics sciences*, Fisher Sholten Unwin (eds.) (à paraître).
- Sanders, L. (1992), *Systèmes de villes et synergétique*, Paris, Anthropos. 274 p.
- Tobler, W.R. (1979), Cellular Geography in: *Philosophy of Geography*. Gale, S., Olsson, G. (eds), Dordrecht, Reidel : 279-386.
- Van der Leeuw, S. (1990), Rythmes temporels, espaces naturels et espaces vécus, in: *Archéologies et Espaces*, Fiches, J.L., van der Leeuw, S.E. (eds). Antibes, A.P.D.C.A. : 299-346.
- Vlora, N. (1979), *Citta e territorio*, Bologna, Pàtron.
- Weidlich, W., Haag, G., 1988, *Interregional Migration, Dynamic theory and comparative analysis*, Berlin, Springer Verlag, 387 p.
- White, R.W. (1977), Dynamic central place theory : results of a simulation approach, *Geographical Analysis* : 226-246.
- White, R.W. (1978), The simulation of central place dynamics : two-sector systems and the rank-size distribution, *Geographical Analysis* : 201-208.
- White, R.W. (1991), *A cellular automata approach to the evolution of urban land use patterns*. Stockholm, Communication to the 7th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography.
- White, R.W. et Engelen (1994), Cellular automata and Fractal Urban Form : A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns, *Environment and planning A* 25(8) : 1175-1199.
- White, R.W., Engelen, G. (1994), Cellular dynamics and GIS : Modelling Spatial Complexity, *Geographical Systems*, 1(2) : 237-253.
- Wilson, A.G. (1981), *Catastrophe Theory and Bifurcation*, London, Croom Helm.
- Zelinski, W., 1971, The hypothesis of the mobility transition, *Geographical Review*, 4, 6 : 219-249.
- Zipf, G.K. (1949), *Human behavior and the principle of least effort*, Addison-Wesley Press, Cambridge, Mass.

