

SIMPOP, UN MODÈLE MULTI-AGENTS POUR L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DE PEUPLEMENT

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

* INED,

** Equipe P.A.R.I.S., URA 1243 CNRS et Université Paris I,

*** LAFORIA, Université Paris VI. Cette recherche a été conduite avec l'aide du Programme Environnement du CNRS (Comité Méthodes, Modèles et Théories) et dans le cadre d'une convention n° EV5V-0021 avec la DGXII de la CEE (projet ARCHAEOMEDES dirigé par Sander van der Leeuw, Université de Cambridge).

Résumé

Les systèmes multi-agents, branche de l'intelligence artificielle distribuée, offrent une grande souplesse pour la modélisation de la dynamique des systèmes complexes. Les méthodes classiques utilisées pour reproduire une dynamique emploient une formalisation par un système d'équations différentielles. La modélisation par les systèmes multi-agents repose sur un ensemble de règles, associant connaissances qualitatives et informations quantitatives, qui permet de manipuler simultanément des échelles géographiques différentes et imbriquées : niveau des individus (niveau microscopique), des villes (méso) et niveau macroscopique d'un territoire. Des mécanismes connus par ailleurs sur les processus de croissance et les interactions spatiales, tels les effets de la concurrence ou de la dissuasion de la distance ou encore de la contraction de l'espace-temps, sont introduits dans les règles de fonctionnement du système.

L'objectif du modèle présenté ici est de reproduire sur une période de temps très longue (environ deux mille ans), le passage d'un système de peuplement relativement homogène et à économie agricole, à une organisation urbaine hiérarchisée. Différentes hypothèses sont testées à l'aide de simulations et cet outil permet ainsi d'évaluer les rôles respectifs des paramètres qui caractérisent les "comportements" des villes ainsi que l'effet des différentes règles qui régissent l'évolution de l'ensemble du système.

Mots Clés

Interaction spatiale - Simulation - Système de villes - Système multi-agents

Les formes d'occupation et d'organisation de l'espace par les villes sont au coeur des discussions relatives à l'aménagement du territoire. Les sociétés contemporaines tentent d'évaluer de quelle liberté elles disposent pour l'organisation de leur habitat. Une analyse rétrospective de l'évolution des systèmes de peuplement, dans leur relation à leur environnement, sur la longue durée, peut contribuer à éclairer ces débats. La transition urbaine des deux derniers siècles a profondément modifié une trame de peuplement villageoise, relativement homogène et dispersée, en une trame urbaine très concentrée et hiérarchisée. Alors que l'organisation spatiale de l'activité humaine des économies agricoles était fortement contrainte par les ressources et les rythmes de l'environnement naturel, ce sont les formes spatiales de la communication humaine qui se sont progressivement imposées.

L'objectif de notre recherche est de modéliser l'émergence et l'histoire des systèmes de villes sur la longue durée. Il s'agit de formuler un modèle qui intègre explicitement les paramètres clés de cette évolution et qui permette donc d'explorer dans quelles conditions les systèmes urbains actuels pourraient être modifiés. Ce modèle dynamique doit alors prendre en compte, d'une manière moins rigide que dans les travaux réalisés jusqu'ici, les propriétés spatiales des systèmes de peuplement et leurs relations avec l'environnement.

Simuler les propriétés émergentes de systèmes complexes, le changement qualitatif des structures, est le défi qui se pose actuellement à la modélisation. Parmi les diverses méthodes proposées, celle des systèmes multi-agents nous a semblé offrir des propriétés intéressantes pour la modélisation dynamique des systèmes de villes.

1. Modélisation dynamique et systèmes multi-agents

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

La plupart de ces modèles utilisent des équations différentielles non linéaires pour décrire l'évolution d'un petit nombre de variables d'état d'un système spatial composé de quelques dizaines d'unités géographiques. Ces modèles sont d'inspiration très diverse, qu'il s'agisse des équations de Volterra-Lotka spatialisées (Dendrinos et Mullaly, 1985), de versions dynamiques de la théorie des lieux centraux (Allen, Sanglier, 1981 ; Camagni, Diappi, 1986 ; Diappi et al., 1990 ; White, 1978), ou des équations maîtresses de la synergie (Weidlich, Haag, 1987 ; Sanders, 1992). D'autres auteurs ont employé par exemple la théorie des catastrophes pour rendre compte de discontinuités dans l'histoire du peuplement, en fonction du développement des échanges (Mees, 1975 ; Wilson, 1981).

D'autres formes de modélisation se prêtent mieux que les équations différentielles à la simulation d'interactions spatiales complexes entre de très grands nombres d'unités géographiques. Elles ont en outre l'avantage de manipuler des changements d'état qualitatifs des éléments. La méthode de type Monte-Carlo proposée par Hägerstrand pour simuler la diffusion spatiale des innovations a été employée par Morrill (1962) pour décrire le développement d'un système de lieux centraux sous l'effet des migrations de population. La mise au point plus récente des méthodes de simulation par automates cellulaires a été saluée par des géographes (Tobler, 1979 ; Couclelis, 1985) comme particulièrement adaptée à l'étude de l'évolution de distributions spatiales. R. White (1991) l'a appliquée en milieu intra-urbain. Le même type de formalisme a permis de tester des hypothèses de croissance fractale des réseaux urbains (Frankhauser, 1993).

Les systèmes multi-agents font partie des méthodes de l'intelligence artificielle distribuée. Un agent est «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).

Dans la plupart des applications, 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. On pourrait tout aussi bien appliquer le formalisme à un autre niveau et considérer que chacun des noyaux d'habitat est constitué d'agents en interrelation, les acteurs individuels qui en modèlent l'évolution. Ici, nous nous intéressons aux propriétés macroscopiques des systèmes de peuplement, en ce qu'elles résultent des interactions qui sont observables à méso-échelle entre les unités constitutives de ces systèmes. Nous faisons donc l'hypothèse simplificatrice, mais autorisée par de nombreuses études empiriques de l'évolution des systèmes de villes, qu'il est pertinent d'admettre chaque localité comme l'unité de base de notre modèle. On doit moins s'attacher aux connotations courantes du vocabulaire méthodologique qu'aux propriétés de la modélisation. Un «agent» peut être une entité collective, son «comportement» est alors décrit par les modifications des variables habituellement utilisées pour la décrire, à ce niveau d'agrégation.

L'intérêt majeur de ce formalisme est d'associer à chaque agent les propriétés et les règles qui définissent ses interactions avec les autres ou son évolution. Même si les règles sont communes aux entités qui composent le système, leur application 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 va se définir 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.

Pour simuler efficacement la «transition urbaine», il faut intégrer dans le modèle les propriétés évolutives des unités de peuplement et les règles d'interaction qui les constituent en système dynamique. On va supposer pour simplifier qu'on se situe dans un système où l'économie agricole est déjà bien établie, et donc qu'il n'y aura pas de création de

nouvelles unités de peuplement. On veut simuler 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 reproduites : 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.

2. Le modèle

La programmation d'un système multi-agents pourrait en théorie se faire dans n'importe quel langage informatique mais dès que l'application est légèrement complexe, impliquant la manipulation de nombreuses interactions et emboîtements, un langage orienté-objet s'impose. Les propriétés du langage et celles des objets entraînent une grande souplesse dans la programmation et sont particulièrement adaptées au formalisme développé dans cette application. Les propriétés d'héritage inhérentes au langage orienté-objet permettent une construction hiérarchisée d'objets de plus en plus complexes. Ainsi un bourg, un village et une capitale régionale sont des objets de même nature mais de complexité croissante. Ces propriétés facilitent une construction progressive du modèle et le rendent flexible et ouvert à de nouvelles modifications.

On considère une région représentée par une grille, dont les cellules peuvent varier en taille et en forme. Chaque cellule de la grille ainsi définie, c'est-à-dire chaque unité spatiale, définit un agent. Les propriétés des systèmes multi-agents permettent de stocker et de gérer localement les informations relatives à chacun des lieux. Dans cette application, les informations gérées pour chaque cellule sont de trois types :

- les contraintes fixes opérant sur le lieu : son environnement naturel (plaine, montagne, mer...), ses ressources (agricoles, minérales, de situation...);
- son contenu, variable au cours du temps : sa population (population totale, agriculteurs, commerçants...), sa richesse, son taux de croissance...;
- son état ou statut (simple village agricole ou ville d'un certain niveau fonctionnel).

Puisque les agents communiquent, les lieux peuvent aussi accéder aux informations relatives à d'autres cellules. Par exemple, on peut modéliser les relations de chalandise ou de concurrence entre cellules dans un voisinage défini par la portée des relations de chacune. Un centre urbain reçoit ainsi des informations de l'ensemble des cellules qui sont dans sa zone d'influence, une cellule «agricole» reçoit quant à elle des informations émises par les centres urbains dont elle dépend. D'autres informations peuvent circuler sur un réseau, de ville à ville, par exemple pour simuler un processus de diffusion hiérarchique d'innovation.

Un ensemble de règles déterminent la nature, le sens et le rythme de l'évolution. Le changement peut être qualitatif comme l'acquisition d'une fonction de niveau supérieur pour une ville, ou quantitatif comme l'accroissement de la population totale ou la variation de la part des commerçants dans la population active par exemple.

L'évolution d'un lieu est simulée à partir d'un ensemble de règles générales. Elle est fonction de ses potentialités en terme de ressources et de population, de sa productivité qui varie selon le niveau de développement technique de l'époque, et du bilan de ses échanges avec les lieux voisins. Certaines de ces règles sont purement déterministes : par exemple, une ville ne pourra accéder au niveau administratif que si aucune autre n'a ce statut dans un certain périmètre ; mais la plupart incluent un terme stochastique : par exemple, une taille minimale est nécessaire pour qu'un village accède au niveau de ville mais ce passage ne se fait pas de manière systématique et la règle associée à cette transition intègre un terme aléatoire. Ainsi, deux lieux de même niveau hiérarchique, plongés dans un environnement semblable et ayant des productivités similaires n'auront pas forcément la même évolution.

Chaque simulation se déroule à travers un certain nombre d'itérations, chacune correspondant à une période de temps. A la fin de chaque itération un bilan des échanges et des événements est opéré à l'échelle de chaque cellule de la grille et la nouvelle configuration est évaluée. Chaque itération comprend plusieurs étapes :

– évaluation du bilan économique de chaque lieu : les échanges entre les unités spatiales jouent un rôle moteur dans la simulation et rendent compte à la fois du prélèvement des villes sur les campagnes et des effets de la compétition entre les villes. En chaque lieu «i» la population induit une certaine demande en biens et en services ainsi qu'une offre. Cette demande (D_i) et cette offre (O_i) sont évaluées en fonction de la population (P_i) du lieu et de paramètres définis globalement et mesurant la propension μ_f par individu à consommer les produits ou services de type f, et la productivité β_f associée à ce produit ou ce service. La demande D_i^f et l'offre O_i^f en produits ou services de type f induites en un lieu i s'écrivent donc :

$$D_i = \sum_{f \in F} D_i^f \quad \text{où } D_i^f = \mu_f P_i$$

où F représente l'ensemble des fonctions économiques,
et $O_i^f = \beta_f P_i$

Une fois évaluées, les valeurs de l'offre et de la demande induites en chaque lieu sont confrontées les unes aux autres par l'intermédiaire des transmissions de messages entre agents. Les échanges sont modélisés en simulant un processus progressif d'adéquation entre offre et demande. L'offre O_i en un lieu donné est d'abord supposée servir à satisfaire la demande locale et seuls les surplus sont commercialisés vers d'autres destinations. La portée des échanges varie en fonction du statut et des fonctions du lieu ; une capitale régionale a une zone d'influence bien supérieure à celle d'un bourg. Cette différenciation des interactions spatiales est facile à modéliser grâce aux possibilités de «communication» entre les agents.

– estimation de la croissance de la population : elle dépend du bilan des échanges qui vient d'être décrit et surtout des bénéfices qui en résultent. A un bilan positif on associe un taux d'accroissement de moyenne élevée, à un bilan négatif un taux faible en moyenne. La valeur du taux d'accroissement sera le résultat d'un tirage d'une variable aléatoire suivant une loi normale de moyenne variable selon le bilan et de même écart type. Cette procédure pourrait être remplacée, dans une version ultérieure du modèle, par un module simulant explicitement les échanges de population entre les lieux ;

– évaluation de la composition de la population active : la population active P_i de chaque lieu i est répartie entre les différents secteurs d'activité associés aux fonctions de ce lieu. Chaque fois qu'une ville acquiert une nouvelle fonction, une certaine part de sa population active est affectée à la nouvelle activité par l'intermédiaire d'un transfert des activités anciennes vers les nouvelles. L'évolution du poids relatif de chaque activité économique est estimée suivant une procédure analogue à celle de la population totale. Les activités bénéficiaires ont une plus grande probabilité d'augmenter leur poids relatif, celui des activités déficitaires, au contraire, tend à diminuer.

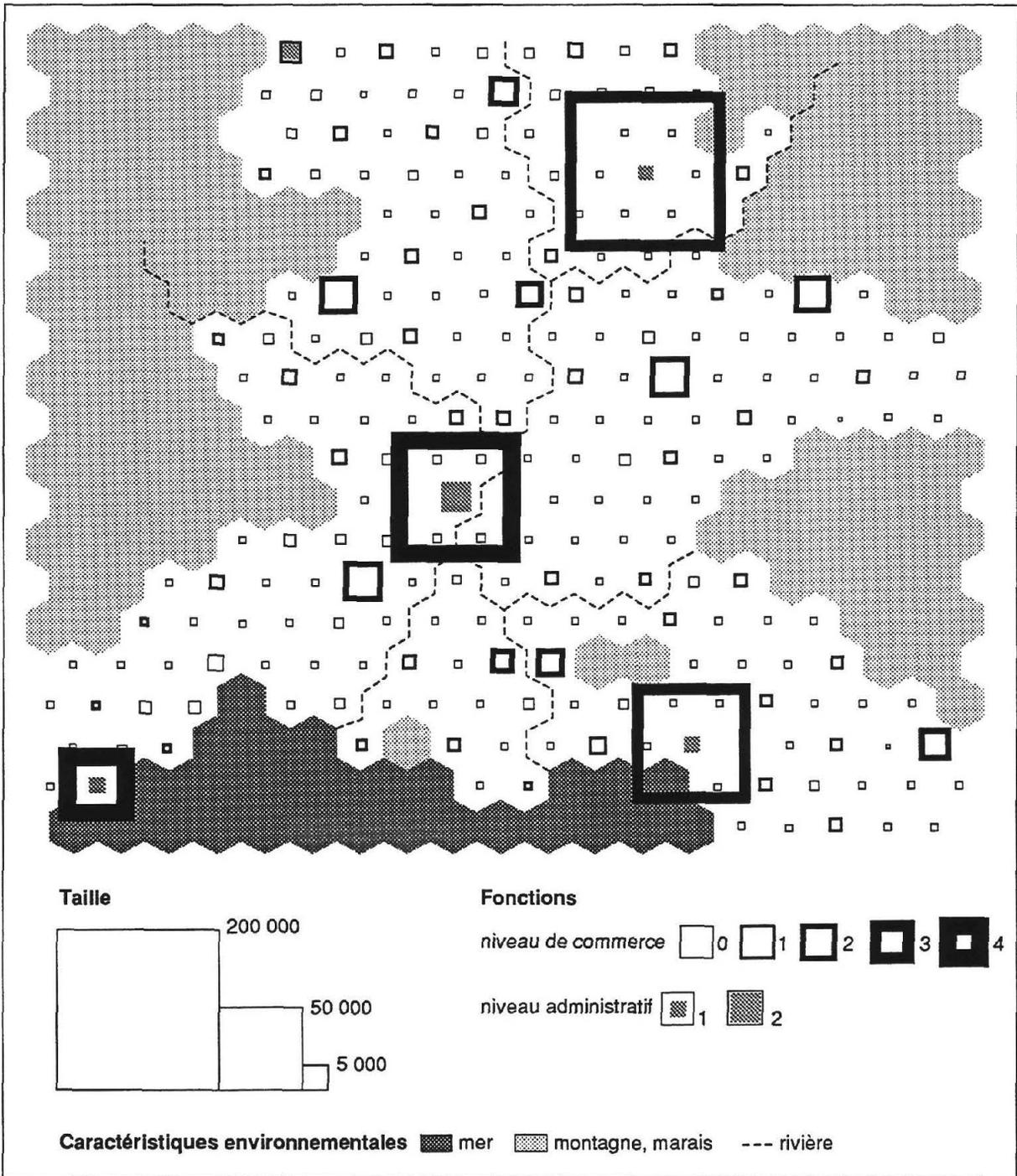
Ces évolutions étant calculées, le statut de chaque lieu est réajusté : acquisition ou perte de certaines fonctions, en fonction de la taille de sa population, de sa richesse et du niveau de fonction existant durant la période qui vient de s'écouler.

Toute la complexité du modèle réside dans la gestion locale des multiples interactions entre unités spatiales. A chaque période, des calculs effectués sur la configuration globale permettent de contrôler a posteriori l'évolution des caractéristiques macroscopiques du système.

3 Les résultats

Nous présentons ici une synthèse de quelques simulations qui illustrent un exemple de mise en oeuvre du modèle. L'espace est symbolisé par un maillage hexagonal d'environ 400 cellules. Les simulations se déroulent sur une durée d'un millénaire. Elles sont découpées en périodes de 10 ans, à la fin desquelles on dresse un bilan. En outre afin de tenir compte de l'apparition de nouvelles technologies, de l'amélioration des réseaux de communication..., on modifie tous les 100 ans la valeur de certains paramètres de manière exogène.

Figure 1 : Le système de peuplement après 1000 années de simulation



Le moteur de la dynamique réside en grande partie dans l'acquisition de nouvelles fonctions urbaines qui permettent aux villes d'étendre leur rayonnement et leur activité commerciale. Dans les simulations présentées ci-dessous, nous avons introduit quatre niveaux de fonctions commerciales, deux niveaux de fonctions administratives qui s'acquièrent aléatoirement selon des seuils de population croissants. Plus le niveau de la fonction est élevé, plus la portée d'action associée est étendue.

D'une simulation à l'autre, on peut choisir de faire varier les conditions initiales (répartition de la population et des ressources naturelles) aussi bien que les paramètres des règles d'acquisition des fonctions urbaines (seuils de population, portées des fonctions...) ou encore les règles de croissance, et comparer ainsi les Évolutions résultantes.

Malgré un mécanisme de croissance simplifié et des contraintes peu nombreuses, on observe sur un grand nombre de simulations, qu'après un millénaire il s'est constitué un réseau hiérarchisé de villes (fig. 1). Chaque lieu de peuplement est figuré par un signe symbolisant ses fonctions et de surface proportionnelle à sa population.

Le taux de variation de la population est calculé pour chaque période. Après une période de fluctuation qui correspond à la phase d'émergence des villes, le taux s'élève progressivement à partir de l'an 600, pour atteindre un taux annuel moyen de 0.6 % (fig. 2). La représentation conjointe de l'évolution de la richesse et de la population totales (fig. 3) montre qu'il existe un mécanisme de régulation entre l'accumulation de la richesse et le développement de la population. Enfin, il faut vérifier que la hiérarchie urbaine obtenue a bien les propriétés observées dans les systèmes de villes au niveau macroscopique. Une représentation de la distribution du nombre de lieux selon leur taille, par période de 100 ans (fig. 4 & 5) montre qu'après un processus de hiérarchisation qui démarre lentement et s'accélère après l'année 400, le degré d'inégalité entre les tailles de villes (pente de la courbe de Pareto) est à peu près conforme à celui qu'on observe dans les systèmes urbains pré-industriels.

Figure 2 : Croissance moyenne de la population (% par tranche de 10 ans)

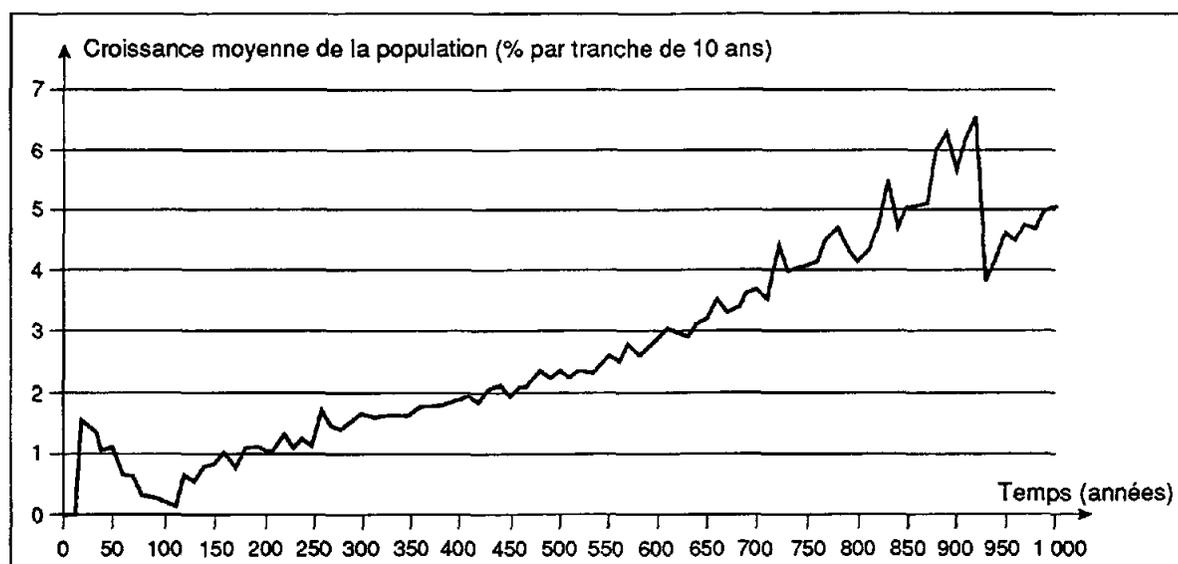


Figure 3 : Evolution conjointe de la richesse et de la population

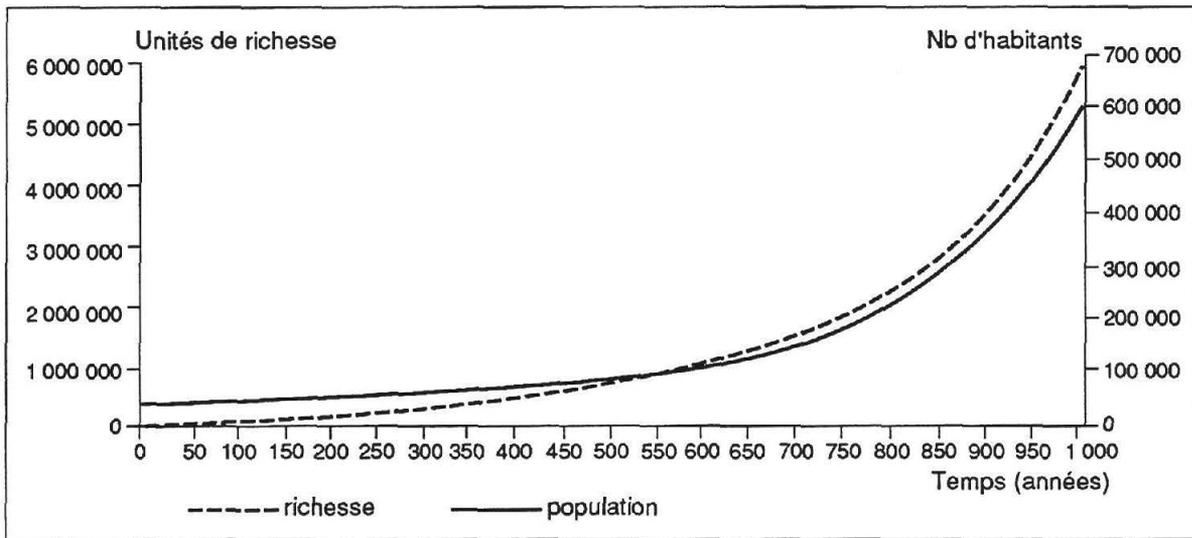


Figure 4 : Distribution rang/taille des lieux de peuplement

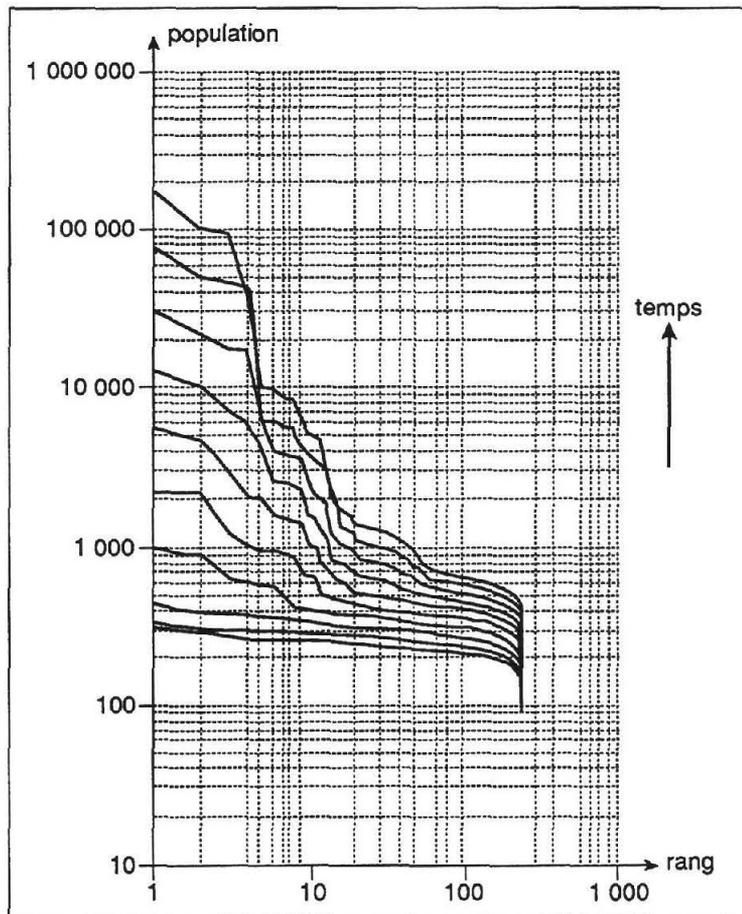
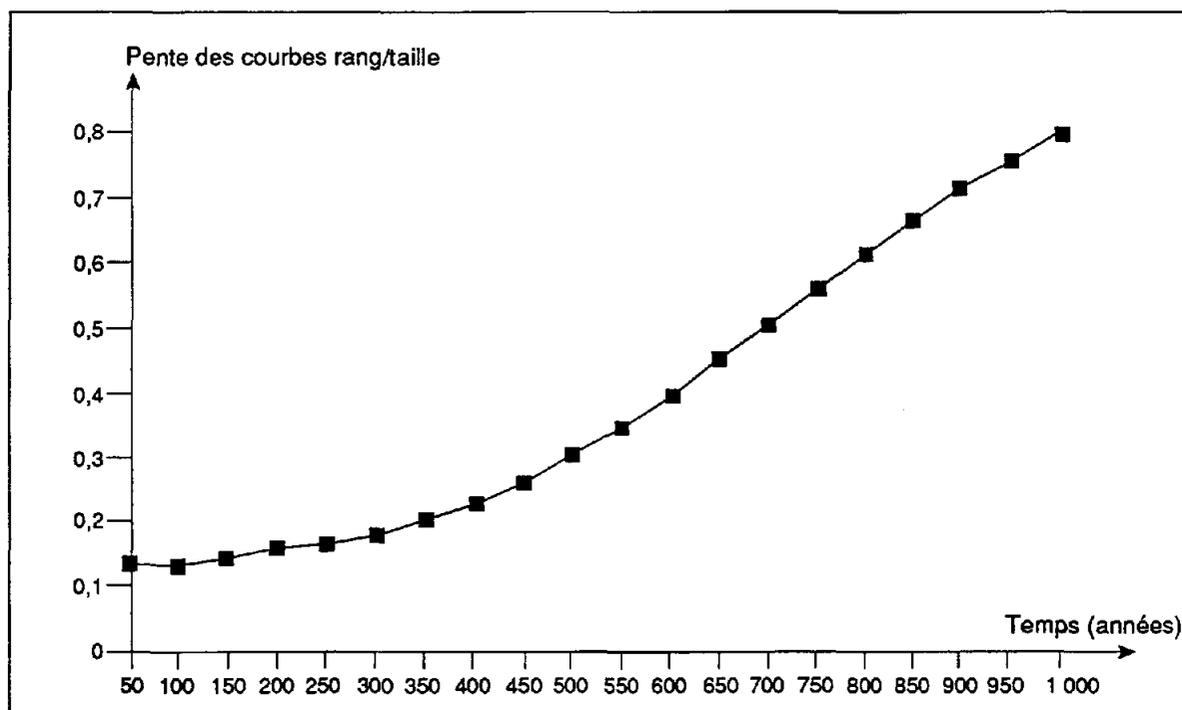


Figure 5 : Pente des courbes rang/taille (100 première villes)



Les résultats de ces premières simulations permettent de renforcer certaines hypothèses sur les conditions d'émergence des hiérarchies urbaines. D'une part l'existence d'un surplus accumulé à partir de la production agricole est un préalable nécessaire à l'apparition durable d'un réseau de villes. D'autre part, la compétition entre les villes est un facteur essentiel dans le processus de différenciation. Par ailleurs, le changement de situation initiale, ou les variations des seuils d'acquisition des fonctions ou encore du mode de répartition de la croissance, n'affectent que la vitesse du processus de hiérarchisation et non son émergence. De plus, pour reproduire le développement du système de peuplement sur une période de temps plus longue, il s'avère nécessaire d'introduire des fonctions urbaines toujours plus diversifiées, correspondant à l'apparition continue de nouvelles formes de productions ou d'organisations économiques et sociales. Si, à un moment donné de l'évolution, aucune nouvelle fonction n'était introduite dans le système, la croissance économique et démographique se ralentirait et la hiérarchie urbaine se stabiliserait vers une forme de distribution trop peu contrastée.

D'autres simulations sont en cours pour compléter l'identification et le calibrage des rôles respectifs de chaque paramètre dans ce processus de hiérarchisation du système des villes.

Références Bibliographiques

- ALLEN P., SANGLIER M., 1981 : *Urban evolution, self-organization and decision making*, Environment and Planning, vol. 13, pp. 167-183.
- BAIROCH P., 1985 : *De Jericho à Mexico, Villes et Économie dans l'histoire*, Paris, Arcades Gallimard, 707 p.
- CAMAGNI R. & DIAPPI L., 1986 : *Urban growth and decline in a hierarchical system : a supply-oriented dynamic approach*, Regional Science and Urban Economics, Vol. 16, pp. 145-160
- COUCLELIS H., 1985 : *Cellular Worlds : a framework for modelling micro-macro dynamics*, Environment and Planning A, pp. 585-596
- DENDRINOS D.S., MULLALY H., 1985 : *Urban Evolution. Studies in the Mathematical Ecology of Cities*, Oxford, Oxford University Press
- DIAPPI L., POMPILI T., STABILINI S., 1990 : *Cities as Interacting Networks : a Loesch Dynamic Approach*, Occasional Paper Series in Socio-Spatial Dynamics, n° 2, University of Kansas
- FERBER J., 1989 : *Des objets aux agents*. Université Paris VI, thèse de doctorat
- FRANKHAUSER P., 1993 : *La fractalité des structures urbaines*. Paris, Anthropos
- GUÉRIN-PACE F., 1993 : *Deux siècles de croissance urbaine*. Paris, Anthropos
- JANELLE D.G., 1969 : *Spatial Reorganization : a Model and Concept*, Annals of the Association of American Geographers, pp. 348-368
- VAN DER LEEUW S., 1990 : *Rythmes temporels, espaces naturels et espaces vécus*, in J.L. Fiches et S.E van der Leeuw ed., Archéologies et Espaces, Antibes, A.P.D.C.A., pp. 299-346
- LEPETIT B., PUMAIN D., 1993 : *Temporalités urbaines*, Paris, Anthropos
- MEES A.I., 1975 : *The revival of Cities in Medieval Europe*, Regional Science and Regional Economics, 5, pp. 403-425
- MORICONI F., 1993 : *L'urbanisation du monde depuis 1950*. Paris, Anthropos
- PUMAIN D., 1982 : *La dynamique des villes*, Paris, Economica, 231p.
- PUMAIN D., SANDERS L., Saint-Julien, 1989 : *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica
- ROBIC M.C. ed, 1991 : *Les géographes entre milieu et environnement*. Paris, Economica
- SANDERS L., 1992 : *Système de villes et synergie*, Paris, Anthropos
- WHITE R., 1991 : *A Cellular Automata Approach to the Evolution of Urban Land Use Pattern*, Communication au 7e colloque de Géographie Théorique et Quantitative, Stockholm
- WILSON A.G., 1981 : *Catastrophe Theory and Bifurcation*, London, Croom Helm