

Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain

Denise Pumain

Volume 42, Number 117, 1998

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/022762ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/022762ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Département de géographie de l'Université Laval

ISSN

0007-9766 (print)

1708-8968 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Pumain, D. (1998). Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain. *Cahiers de géographie du Québec*, 42(117), 349–366.
<https://doi.org/10.7202/022762ar>

Article abstract

Self-organization theory provides a framework for transferring non-linear dynamic models from physical sciences towards social sciences, especially urban geography. The compatibility of this theory with observed features of change in spatial systems is analysed. A provisional evaluation of the main applications to the structuring of cities and systems of cities is tempted. The heuristic and pedagogical advantages of those models are underlined. They can produce qualitative change stemming from small quantitative variations in some parameter values. However, there are limitations to the analogy between physical and geographical systems. Experimental results lead to revise those models in the light of an evolutionary theory. They should include the creative and cognitive behaviours which characterize the genesis of complexity in spatial systems.

Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain

Denise Pumain

Laboratoire P.A.R.I.S. - E.H.GO

CNRS et Université de Paris I

Résumé

C'est en référence à la théorie de l'auto-organisation que des modèles dynamiques non linéaires ont été transposés depuis les sciences physiques vers les sciences sociales et, en particulier, la géographie urbaine. On analyse la compatibilité entre cette théorie et les modalités observées du changement dans les systèmes spatiaux. Un bilan provisoire des principales applications à la structuration des villes et des systèmes de villes souligne les vertus heuristiques et didactiques de ces modèles, qui peuvent engendrer des changements qualitatifs à partir de petites variations quantitatives de certains paramètres. Toutefois, l'analogie entre systèmes physiques et systèmes géographiques a des limites et le résultat des expérimentations invite à compléter ces modèles dans le cadre d'une théorie évolutive, pour tenir compte des aspects créatifs et cognitifs intervenant dans la genèse de la complexité des systèmes spatiaux.

Mots-clés : auto-organisation, ville, système de villes, modèles dynamiques, changement urbain.

Abstract

Self-Organization Models and Urban Change

Self-organization theory provides a framework for transferring non-linear dynamic models from physical sciences towards social sciences, especially urban geography. The compatibility of this theory with observed features of change in spatial systems is analysed. A provisional evaluation of the main applications to the structuring of cities and systems of cities is tempted. The heuristic and pedagogical advantages of those models are underlined. They can produce qualitative change stemming from small quantitative variations in some parameter values. However, there are limitations to the analogy between physical and geographical systems. Experimental results lead to revise those models in the light of an evolutionary theory. They should include the creative and cognitive behaviours which characterize the genesis of complexity in spatial systems.

Key-words : self-organization, cities, systems of cities, dynamic modelling, urban change.

adresse postale : Équipe P.a.r.i.s., CNRS et Université de Paris I
13, rue du Four, 75006 Paris, France
courriel (*e-mail*) : pumain@paris.msh-paris.fr

INTRODUCTION

Une contribution de la géographie à l'interprétation du changement urbain peut consister à expliciter la composante spatiale de la dynamique des villes. Cette recherche, encore peu formalisée, a trouvé récemment un cadre et surtout des outils de modélisation avec la théorie de l'auto-organisation. Les réflexions qui suivent sont issues de recherches sur les villes, menées en fonction d'une problématique de géographe et dans une perspective, non pas empiriste, mais soucieuse d'appuyer sur des observations une formalisation théorique, selon une démarche rétroductive. Il n'est pas anecdotique de le préciser, car les jugements qui seront portés ici sur les modèles en dépendent.

Un simple survol des titres de la littérature montre un essor des publications sur la théorie de l'auto-organisation dans les sciences sociales, dans le courant des années 1980 et au début des années 1990. Le ralentissement actuel pourrait laisser penser au terme d'un effet de mode, ou bien à l'introduction d'autres formes de modélisation, plus adaptées. Il s'agit de préciser, dans ce contexte, ce que les modèles d'auto-organisation peuvent apporter à l'étude du changement urbain.

LE CHANGEMENT DANS LES SYSTÈMES SPATIAUX

Face à l'éventualité d'une analyse soumise aux effets de mode, nous tenons à préciser que, au moins en ce qui nous concerne, la démarche de recherche n'a pas consisté à découvrir d'abord les théories de l'auto-organisation et les modèles dynamiques, puis à leur chercher des applications en géographie. Au contraire, c'est à partir d'observations comparatives du changement dans les villes, sur moyenne et longue durée, que nous avons découvert des modalités d'évolution qui n'avaient pas encore été formalisées de manière satisfaisante (Pumain et Saint-Julien, 1979). Les concepts liés aux systèmes urbains étaient déjà bien travaillés (Berry, 1964; Pred, 1977), mais la modélisation de leur dynamique, de type forresterien (Fournier, 1990), ne permettait guère de prendre en compte leur dimension spatiale, tandis que les grands modèles en usage pour la planification, inspirés de celui de Lowry, étaient plutôt statiques par essence (Wegener, 1994).

LA THÉORIE DE L'AUTO-ORGANISATION ET LE CHANGEMENT

On réunit sous l'appellation « théorie de l'auto-organisation » des propositions relativement similaires issues de celle des structures dissipatives (Prigogine et Stengers, 1979) ou de la synergetique (Haken, 1977). Ces deux approches ont fait l'objet de transpositions, de transfert, vers les sciences humaines.

Les chimistes et les physiciens, qui présentent les approches en question, insistent généralement sur la rupture épistémologique que les théories de l'auto-organisation ont marquée par rapport à la physique newtonienne : elles traitent de phénomènes irréversibles (la « flèche du temps » est retrouvée); de systèmes dont la trajectoire temporelle est unique (historicité des objets) et qui, n'étant pas fermés mais au contraire maintenus sous apport d'énergie (systèmes loin de l'équilibre), sont susceptibles de se structurer spatialement en fonction des corrélations à longue portée qui s'établissent, sous certaines conditions, entre les particules qui les composent.

Pour les sciences humaines, ces idées n'ont évidemment rien d'original, et ce n'est donc pas d'abord dans cette « nouvelle alliance » avec les sciences dures que réside pour elles l'intérêt des théories de l'auto-organisation. Un premier apport de ces théories réside dans une forme de description du changement qui est compatible avec les observations effectuées sur certains systèmes spatiaux. Rappelons que ces théories concernent des systèmes qui peuvent être décrits à au moins deux niveaux d'observation : celui, macroscopique, de l'ensemble du système; celui, microscopique, des éléments très nombreux qui composent cet ensemble. Une configuration décrit un arrangement particulier des éléments en sous-systèmes, selon les états dans lesquels ils se trouvent. Les systèmes évoluent selon deux modes : des trajectoires stables et des bifurcations. Les trajectoires stables correspondent à des périodes où la configuration d'ensemble du système (décrite par des variables d'état définies au niveau macroscopique) ne se modifie guère ou évolue lentement, en dépit des nombreuses fluctuations qui peuvent affecter les variations d'état de chacun des éléments du système. Les bifurcations correspondent à des phases d'instabilité, pendant lesquelles le système « saute » d'une trajectoire à une autre. Cette transformation qualitative est causée par une légère variation quantitative d'un des paramètres qui gouvernent l'évolution du système. Il peut s'agir de l'amplification d'une fluctuation interne au système ou de l'irruption d'une perturbation extérieure. Bien que les modèles qui décrivent les trajectoires puissent être totalement déterministes, il est alors impossible de prévoir vers quel type de nouvelle trajectoire le système s'oriente lors d'une bifurcation.

Le changement fait alors partie de la mise en forme du système. C'est ainsi que les systèmes auto-organisés ne sont jamais en équilibre. Ils se transforment de façon continue sous l'action de processus dynamiques, internes et externes. Si une structure émerge et se maintient de façon suffisamment persistante pour être reconnaissable, elle n'en est pas moins le produit de cette évolution. Une deuxième contribution majeure de la théorie de l'auto-organisation est ainsi de proposer une formalisation du changement d'échelle, en considérant l'émergence de structures à un niveau d'observation donné comme le résultat des interactions entre les éléments du niveau inférieur. Dès lors, on est invité à mettre l'accent, dans la modélisation, sur les processus et sur l'évolution plutôt que sur les structures. La théorie suggère que, si des formes sont repérables, identifiables, c'est parce que la dynamique des interactions « saute », de bifurcation en bifurcation, d'une trajectoire stable à une autre, introduisant ainsi des discontinuités. Seules certaines trajectoires sont réalisées, parmi l'infinité des états possibles que donnerait une simple combinatoire des arrangements de tous les états des éléments.

L'apport essentiel de la théorie est que ces propositions, somme toute banales quand on les exprime sous une forme littéraire — l'histoire n'est-elle pas toute entière faite de périodes de plus ou moins grande stabilité et coupées de révolutions? — sont formalisées par des modèles mathématiques et donc permettent l'expérimentation. Les modèles d'équations différentielles non linéaires sont susceptibles d'admettre des solutions multiples, accessibles par résolution analytique ou par la simulation. Elles correspondent à des attracteurs de la dynamique, qui décrivent des états qualitativement différents pour les systèmes de la sorte simulés. Dans les équations, les variables représentent en général les descripteurs de la structure qui sont susceptibles de dynamiques relativement rapides, tandis que les paramètres figurent des caractéristiques du système évoluant

plus lentement. De tels modèles sont susceptibles de plusieurs types d'utilisation : simulation d'une dynamique; test de sensibilité aux variations de valeurs de certains paramètres. Ils permettent quelquefois d'étayer des prévisions, plus complexes que de simples projections, notamment à court terme. Mais le plus souvent, en raison des bifurcations éventuelles, il s'agit d'une exploration de futurs possibles plutôt que d'une prévision du changement.

ANALOGIE AVEC LE CHANGEMENT URBAIN

Les modalités du changement observé dans les villes ou dans les systèmes de villes ressemblent à celles que décrivent les théories physiques de l'auto-organisation. Selon la formulation fameuse de Berry (1964) — *cities as systems within systems of cities* —, les géographes étudient les villes à trois niveaux principaux d'observation, qui sont celui des acteurs urbains (individus, ménages, entreprises, institutions), celui des villes (conçues comme des entités ayant un certain degré d'autonomie et de permanence) et celui des systèmes de villes (envisagés dans des territoires régionaux ou nationaux, voire supra-nationaux, qui définissent et régulent la forme et l'intensité des interdépendances entre les villes).

À l'échelle du système des villes, les changements dans la configuration morphologique (urbanisme), dans les activités (industrialisation ou tertiarisation), dans la composition sociale (développement du salariat, augmentation des qualifications), dans le nombre des habitants (exode rural, croissance urbaine) n'apparaissent pas de façon isolée et sporadique dans un seul élément du système. Au contraire, les résultats d'analyses détaillées du changement intervenu dans l'ensemble des villes d'un même territoire montrent une grande homogénéité et simultanéité des transformations qui se sont produites au cours d'une période donnée (Pumain et Saint-Julien, 1979). Comme le changement est presque de même intensité partout, les inégalités et différences qui existent à un moment donné entre les villes se maintiennent sur des durées assez longues. Tout se passe comme si, au cours d'une période donnée, les villes appartenant à un même système subissaient une simple translation dans l'espace défini par leurs caractéristiques socio-économiques, le système de peuplement s'adaptant au changement sans déformer sa structure.

Cette propriété dynamique se traduit par une méta-stabilité de la structure fonctionnelle et hiérarchique du système, sur des durées respectivement moyennes (les spécialisations économiques, sociales ou culturelles restent très affirmées pendant au moins quelques décennies) et longues (les inégalités de la taille des villes, en particulier dans la partie supérieure de la hiérarchie, peuvent durer plusieurs siècles). La résilience de la structure du système résulte de sa forte connexité, assurée par les échanges matériels et surtout les échanges d'information, ainsi que par les attitudes de concurrence et les comportements d'imitation des acteurs localisés, qui assurent une diffusion de plus en plus rapide des innovations. La vitesse d'adaptation au changement du système est ainsi devenue beaucoup plus forte que sa vitesse propre de transformation. Cette tendance s'est accentuée au cours des temps historiques avec l'augmentation de la vitesse des communications, qui tend à augmenter la portée spatiale des interactions dans le système de peuplement et qui a par ailleurs pour conséquence générale un renforcement de la structure hiérarchique de celui-ci (Pumain, 1997).

On note donc à la fois une persistance ou une transformation lente de la structure du système (état macro-géographique du système des villes décrit par exemple par la forme de la distribution des tailles des villes, les principaux facteurs de différenciation des activités et des compositions sociales des villes) et de très nombreuses fluctuations dans la situation relative de ses éléments. Au niveau méso-géographique, c'est le passage rapide que décrit chaque ville, entre des « états » de croissance, de stagnation et de décroissance démographique. Ce sont aussi des changements de rang qu'occupe chaque ville dans la hiérarchie des tailles. Ou bien encore, il s'agit des modifications du profil socio-économique que décrit chaque ville, lesquelles sont tantôt en avance, tantôt en phase ou en retard sur une transformation commune (Pumain et Saint-Julien, 1979). Les fluctuations (ou passage des éléments d'un état à un autre) sont plus évidentes si l'on considère le niveau d'observation le plus « microscopique » pour l'investigation géographique, c'est-à-dire celui des individus, ménages ou entreprises, qui résident dans les villes, à l'échelle de temps d'une année (mobilités résidentielles et professionnelles, créations et disparitions d'entreprises) comme à celle du remplacement des générations. Les individus bougent et changent d'état très fréquemment, tandis que la morphologie urbaine, décrite par ses attributs physiques ou sociaux, persiste et se transforme selon une temporalité plus longue.

À l'échelle de la ville comme à celle du système des villes, on peut donc considérer que la structure de différenciation du système est maintenue par la multiplicité des interactions entre les acteurs composant chaque ville. Tout se passe comme si, alors que les réseaux sociaux se renouvellent par migration des personnes et d'une génération à l'autre, certains savoir-faire urbains se perpétuaient dans les mêmes lieux. Ce qui ne peut se comprendre que par un ensemble d'effets en retour et de contraintes exercées par les lieux sur les acteurs, et par des processus d'apprentissage exigeant un temps assez long pour apporter des résultats significatifs dans la compétition urbaine.

AUTO-ORGANISATION ET EXPLICATION

Transposée aux systèmes urbains, la notion d'auto-organisation suggère que, pour expliquer leur structuration selon une architecture identifiable parce que persistante, il n'y a pas une finalité politique ou économique explicite qu'il serait possible de décrire du point de vue d'une fonction à optimiser. La structure est plutôt le produit involontaire d'interactions multiples entre des acteurs très nombreux. Chacun agit selon ses finalités et ses stratégies propres, mais il n'est pas nécessaire de connaître en détail chacune de ces stratégies pour prédire (ou simuler) l'architecture générale du système. Quelle qu'ait été et soit encore l'efficacité des interventions destinées explicitement à contrôler un territoire au moyen de l'implantation régulière de fonctions centrales, le plus souvent hiérarchisées, il peut être tenu pour certain que ces fonctions ne constituent pas le déterminant essentiel de la structure et de l'évolution des systèmes de peuplement. Certes, des généraux, des administrateurs, des colonisateurs ont pu dresser des plans d'occupation d'un territoire par un réseau de places fortes, de préfectures ou de campements. Certaines localisations urbaines ont été imposées arbitrairement par des pouvoirs politiques (Richelieu en France) ou économiques (Sun City en Afrique du sud) ou encore par des aménageurs (les villes nouvelles). Cependant,

si ces actions volontaires contrôlaient vraiment de façon effective toute l'organisation des systèmes de peuplement, elles se traduiraient nécessairement par une plus grande variété de formes, selon les régimes politiques et les systèmes économiques, et par des à-coups plus prononcés dans leur évolution.

Le plus grand nombre des décisions qui sont prises et qui ont pour effet d'agir sur la structure du système de peuplement — décisions individuelles de migrer, décisions d'implanter une entreprise, de bâtir des constructions — le sont en dehors de toute planification autoritaire ou de toute volonté concertée, et le plus souvent en toute inconscience de l'existence d'un « système » matérialisant les interdépendances entre les lieux. Même dans les Etats les plus policés, il n'existe aucune autorité qui soit chargée de veiller à maintenir les proportions constatées dans l'évolution des systèmes de peuplement. C'est en dépit de la diversité de la personnalité des acteurs, de leurs motivations et de leurs actions, que l'agrégation de leurs comportements produit des régularités, repérables en vertu aussi bien de l'évolution d'une ville que de celle du système des villes. Ces actions « microscopiques » sont en réalité effectuées sous une contrainte forte. Les acteurs individuels et collectifs qui composent le milieu social d'une ville ne sont pas indépendants mais connectés, informés mutuellement de leurs actions. Ils sont en concurrence avec ceux des autres villes pour capter les profits associés à l'exploitation des innovations. Les routes et relations qui unissent les villes d'un même système sont aussi des réseaux sociaux par lesquels transitent les informations. Une ville ne saurait évoluer indépendamment des autres villes, sans que ses acquis ne soient aussitôt imités ou contestés. Les acteurs qui ont investi dans une ville sont en concurrence avec ceux qui ont investi dans d'autres villes. Cette concurrence, qui est le corollaire de la connexité des réseaux urbains, conduit par agrégation à une concurrence entre les villes du système des villes (laquelle peut s'exprimer parfois ouvertement dans des opérations de marketing urbain). Elle explique la métastabilité de la structure du système évoluant en fonction de cet ensemble d'interactions.

En permettant, non pas une prédiction exacte, mais l'exploration d'une diversité de futurs possibles, les modèles issus de la théorie de l'auto-organisation aideront-ils à étudier de façon nomothétique le changement des structures géographiques? C'est une nouvelle perspective sur le changement, qui voudrait éviter de n'expliquer l'événement qu'*a posteriori*, en ne retenant que les éléments qui convergent, que les structures qui se conservent. Cela suppose de renverser les perspectives habituelles à l'étude des transformations des objets géographiques. Il ne s'agit plus de rechercher l'explication d'une localisation, d'un « être géographique », en prenant en compte toute son histoire, en reconstituant sa genèse dans ce qu'elle a d'unique. Il ne s'agit plus de faire l'histoire comme le chemin qu'on parcourt à reculons pour trouver une « explication » dans le récit de la biographie d'un lieu. On fait l'hypothèse que les objets géographiques, dans certains aspects au moins, représentent des réalisations particulières, parmi un univers de réalisations possibles, de processus dynamiques généraux.

Dans les applications de modèles dynamiques qui ont été faites aux régions (Allen et Sanglier, 1981; Weidlich et Haag, 1988) ou aux villes (Allen et Sanglier, 1979; Pumain *et al.*, 1989; Sanders, 1992), histoire et géographie changent leurs

relations. La géographie n'est plus le théâtre des opérations sur lequel l'histoire inscrirait ses événements. L'histoire n'est plus l'explication ultime d'une identité locale, entendue comme la reconstitution de l'itinéraire temporel irréversible qui conduisit nécessairement à l'objet géographique observé aujourd'hui, dans son irréductible unicité. Les deux disciplines s'éclairent réciproquement en s'intéressant à la morphogenèse des structures socio-spatiales, aux processus qui font advenir et devenir l'espace géographique. « L'histoire, alors, est le processus par lequel le temps transforme un présent unique en une multiplicité de passés possibles » (Lepetit, 1993). Dans cette optique, on perd les notions d'unicité et de non-reproductibilité attachées aux objets historiques, mais on prend en compte l'irréversibilité de la trajectoire particulière de chacun de ceux-ci. On admet que les processus soient formalisables, que les objets géographiques puissent avoir une « dynamique banale » dans une tendance historique qui demeure irréversible.

LES TYPES DE MODÈLES ET LEURS APPORTS

Les modèles non linéaires, qui comportent des interdépendances entre les variables, peuvent produire des dynamiques très compliquées, même à partir d'équations mathématiques assez simples (May, 1976). Cette aptitude des équations différentielles non linéaires à engendrer des comportements complexes pour les variables d'état est différemment exploitée, selon que l'objectif est d'employer le modèle pour effectuer des projections relativement précises — on recherche alors des modèles simples, qui donnent une description réductrice du système mais susceptible de solutions analytiques ou d'ajustements — ou selon qu'il s'agit d'explorer des représentations plus complètes des systèmes urbains.

LES DISCONTINUITÉS DE LA CROISSANCE URBAINE

Les équations de la théorie mathématique des catastrophes conçue par René Thom (1974) permettent d'établir une correspondance entre les variations d'un petit nombre de paramètres et la forme qualitative de la dynamique d'un système décrit par une ou deux variables d'état. Wilson (1981) et Rosser (1991) en ont recensé les applications à la géographie et à l'économie spatiale. Le plus souvent, il s'agit d'expliquer des discontinuités dans la croissance des villes. Par exemple, Mees (1975) interprète la reprise de l'urbanisation en Europe au Moyen-Âge à partir des variations d'intensité du coût des transports à longue distance; Papageorgiou (1980) relie la croissance des villes-champignons à la formation d'économies d'agglomération; Wilson (1981) montre que, si les avantages d'agglomération sont une fonction logistique de la taille des villes et les coûts liés à la congestion en sont une fonction linéaire, la taille des villes peut évoluer selon une « catastrophe » de type pli; Casseti (1991) analyse la transition urbaine dans le monde entre le XVII^e et le XX^e siècle en vertu du schème de la fronce entre deux états d'équilibre. D'une façon plus générale, les modèles d'auto-organisation comportent des fonctions susceptibles de produire des accélérations fortes de la croissance des villes ou des retournements vers un déclin, pour une variation continue de la valeur de certains paramètres.

LA DYNAMIQUE RELATIVE D'ENTITÉS SPATIALES CONCURRENTES

Par delà un développement (ou un déclin) d'ensemble et qui affecte plus ou moins toutes les parties d'un système (ce qu'expliquerait par exemple la théorie de la diffusion spatiale des innovations), la dynamique d'entités géographiques appartenant à un même territoire (quartiers d'une ville, régions d'un État, villes d'un système de villes, centre et périphérie, etc.) montre souvent des inégalités locales qui se traduisent par des mouvements plus ou moins prolongés de gain ou de perte de l'importance relative d'une partie du système par rapport à la partie correspondante d'autres systèmes. Le modèle proie-prédateur de Volterra-Lotka a été fréquemment appliqué pour simuler cette dynamique relative d'unités spatiales concurrentes. Dendrinis (1984) et Dendrinis et Mullaly (1985) ont employé ce modèle de plusieurs façons pour simuler l'évolution différentielle des populations et des revenus de villes et de régions, tandis que d'autres (Zhang, 1990) ont utilisé son aptitude à reproduire des variations cycliques dans un modèle dynamique centre-périphérie. Haag (1984) a montré comment déduire un modèle de type Volterra-Lotka, pour deux populations et deux zones, en partant d'une approche par équations maîtresses qui explicite la relation entre le comportement des individus et celui du système.

LA SIMULATION DES DYNAMIQUES INTRA-URBAINES COMPLEXES

Si la plupart des modèles cités précédemment admettent des solutions analytiques et permettent de connaître l'ensemble des états entre lesquels le système évolue, d'autres modèles ont été conçus pour explorer des dynamiques plus complexes. L'objectif pouvait être heuristique, afin de relier des types de formes urbaines à des configurations de paramètres ou à des scénarios, ou bien de type opérationnel impliquant une description plus complète, sinon plus réaliste, du système modélisé.

Il en est ainsi des modèles utilisés pour simuler la dynamique des emplois, des populations résidentes et des services entre les quartiers d'une ville, modèles développés par l'école de Bruxelles (Allen, 1978) et l'école de Leeds (Harris et Wilson, 1978). On peut les considérer comme des extensions dynamiques du modèle urbain de Lowry (1964). Ces modèles ont fait l'objet d'applications nombreuses à des situations urbaines concrètes, par exemple à des métropoles françaises (Pumain *et al.*, 1989), à la ville de Leeds (Clarke et Wilson, 1983) ou encore à des régions en Belgique, aux Pays-Bas, aux États-Unis et au Sénégal (Allen, 1997).

Signalons enfin la formulation, parfois sous forme d'équations différentielles, parfois au moyen d'automates cellulaires ou d'autres outils de simulation informatiques, de modèles dynamiques qui tentent d'expliquer la fractalité des morphologies urbaines (Frankhauser, 1994; Batty et Longley, 1994).

LES MODÈLES DYNAMIQUES DE SYSTÈMES DE VILLES

Plusieurs auteurs ont tenté des modélisations dynamiques de la hiérarchie des lieux centraux. Dans certains modèles dynamiques, cette hiérarchie est déduite des relations entre les services et les consommateurs (White, 1977 et 1978) ou bien d'après un processus plus ou moins aléatoire d'entrée sur le marché de producteurs

concurrents (Allen et Sanglier, 1979). Ces modèles n'ont guère fait l'objet d'applications. Plus récemment, Fik et Mulligan (1990) et Kremenec et Esparza (1993) ont proposé des modèles dynamiques qui explicitent les flux échangés dans un système de lieux centraux. Cependant, les modèles d'équations différentielles formalisent difficilement les interactions spatiales complexes qui relient les villes des réseaux urbains. D'autres méthodes de simulation, comme celle des automates cellulaires (Couclelis, 1985) ou celle des systèmes multi-agents, sont aujourd'hui explorées (Bura *et al.*, 1996).

Le modèle proposé par Weidlich et Haag (1988) utilise la technique des équations maîtresses pour formaliser le lien entre la probabilité individuelle de migrer et l'évolution de la répartition de la population dans un système de régions. Il est calibré à partir d'une ou de plusieurs matrices de migrations inter-régionales. Il a été appliqué avec succès à la dynamique d'un système de villes (Haag *et al.*, 1992; Sanders, 1992).

DE L'AUTO-ORGANISATION À L'ÉVOLUTION

Si les concepts et les modèles dynamiques proposés par les physiciens ou les mathématiciens sont toujours en usage pour la construction et la mise à l'épreuve de modèles urbains, un glissement est apparent dans les références théoriques qui aujourd'hui renvoient plus souvent à des analogies avec les systèmes vivants et substituent, à la notion d'auto-organisation, celle d'évolution (Allen, 1991 et 1997). Les limites rencontrées dans l'application des modèles d'auto-organisation incitent à fonder la construction et l'emploi des modèles dynamiques dans une théorie propre de la dynamique des systèmes spatiaux. Cela implique entre autres une meilleure intégration, dans les modèles, des connaissances acquises au sujet des comportements des acteurs urbains.

LES LIMITES DES MODÈLES D'AUTO-ORGANISATION

L'application des modèles non linéaires pose des problèmes spécifiques qui ne peuvent être développés ici, mais qui doivent être signalés si l'on veut qualifier précisément les possibilités opératoires de la théorie. Les difficultés de calibrage, associées à la capacité élevée de bifurcation des modèles, ont été maintes fois décrites, de même que l'impossibilité de valider comme « meilleur ajustement » une configuration donnée de paramètres. On a pu noter aussi, par exemple à propos de l'usage du modèle proie-prédateur, la difficulté de séparer nettement l'effet des différents paramètres (dynamique démographique naturelle de chaque espèce, paramètre d'interaction entre espèces) dans un ajustement donné.

Cependant, dans certains cas (comme celui développé dans le présent recueil par Lena Sanders à propos de la synergétique), la modélisation permet des projections, des estimations, des tests de différents scénarios. Par exemple, on peut calculer et comparer les tendances en cours dans des configurations de migrations inter-régionales, lors même que ces migrations interviennent dans des pays ayant des nombres de circonscriptions différents (Weidlich et Haag, 1988), ce que ne permettent pas les modèles classiques d'ajustement des migrations. En outre, on peut mesurer un écart, décrit par une certaine matrice de migrations, entre une

configuration existante et celle que produirait un certain système d'échanges. Enfin, comparativement à d'autres types de modélisation dynamique des mouvements migratoires, le modèle synergétique a l'intérêt de donner des trajectoires stables, de ne pas basculer dans le chaos.

Les modèles dynamiques gardent une fonction didactique et heuristique essentielle, pour mettre à l'épreuve les propositions théoriques et les connaissances acquises sur le changement spatial. Il s'agit surtout de comprendre l'évolution des répartitions plus ou moins concentrées et de montrer leur dépendance à l'égard des variations, parfois très légères, d'un petit nombre de paramètres. On répond à la question : toutes choses égales par ailleurs, que se passe-t-il dans l'environnement urbain lorsque les économies d'agglomération s'affirment; lorsque les coûts liés à la distance d'interaction augmentent; lorsque les liens inter-établissements s'affaiblissent; lorsque les prix du pétrole baissent? Comment des processus ségrégatifs peuvent-ils s'imposer à partir d'une modification des « préférences » affichées par les acteurs pour la composition sociale de leur voisinage? On peut aussi se demander à partir de quel seuil critique un investissement dans un quartier urbain (par exemple un centre commercial) peut établir un nœud de centralité, nouveau et persistant, et transformer ainsi, au moins localement, la configuration spatiale du système?

En revanche, le modèle ne peut simuler le changement des variables utiles à la description de l'évolution du système. Il est capable de simuler des formes différentes, mais il ne peut se transformer lui-même. Par exemple, si une nouvelle catégorie d'activités apparaît avec des localisations spécifiques, il faut modifier le modèle de façon exogène pour mettre en évidence les dynamiques associées à cette catégorie nouvelle. Les modèles dynamiques actuels sont encore impuissants à rendre compte de l'émergence des nouvelles fonctions et des nouveaux éléments qui obligent à réviser les nomenclatures employées pour décrire l'état des systèmes (Allen, 1991). Pour résoudre ce mystère de l'apparition du changement, de la création de la nouveauté, la géographie s'intéresse aux travaux des économistes sur les conditions d'apparition des innovations, à ceux des sociologues qui étudieraient la persistance des réseaux sociaux localisés, par-delà les générations, selon un processus d'accumulation et de hiérarchisation du capital social investi dans les lieux. La géographie explore les conditions et les modalités de la transformation des structures spatiales.

VERS UNE THÉORIE ÉVOLUTIVE

De la confrontation des observations précédentes et des expériences avec les modèles est issue une construction progressive de ce que j'ai appelé une « théorie évolutive des systèmes de villes » (Pumain, 1994 et 1997). Il s'agit de compléter l'approche classique des réseaux urbains en montrant comment leurs principales propriétés (différenciation hiérarchique, trame spatiale et variété fonctionnelle) sont le produit des modalités de processus évolutifs généraux, le plus souvent inintentionnels et qui s'expriment selon des formes légèrement différentes en fonction de plusieurs contraintes : la période de mise en place des systèmes de peuplement (vitesse des communications), la forme politico-administrative de contrôle du territoire et la tendance historique des techniques qui conduisent à la rétraction de l'espace-temps.

La théorie évolutive des systèmes de villes n'est pas une théorie du changement social. Elle n'explique pas pourquoi on passe de telle forme d'organisation de la production ou de la société à telle autre. Cette théorie se veut une contribution à l'interprétation du changement spatial dans une théorie sociale, c'est-à-dire du changement des formes particulières prises par le rassemblement des populations dans des villes différenciées par leur taille et leur composition sociale. La théorie souligne et explicite le lien entre la ville et le système des villes. Elle montre que la permanence de ces systèmes est liée à leur extraordinaire capacité d'adaptation aux changements intervenant dans l'organisation de la production et de la société. Elle précise comment cette adaptation s'effectue. Elle conduit à étayer des méthodes de comparaison et certaines prévisions (du moins en probabilité).

On est ainsi amené à concevoir un système de villes comme une forme d'adaptation au changement engendrée par les sociétés humaines, une invention dont la technicité n'est en général guère perçue dans les représentations collectives. Trois processus dynamiques essentiels peuvent être simulés par des modèles d'auto-organisation :

- i) la transition urbaine qui fait dériver la plupart des systèmes de villes par *expansion, concentration et diversification* d'un semis de peuplement ayant pour fonction originelle l'exploitation agricole d'un territoire;
- ii) la concurrence inter-urbaine qui s'exerce dans le réseau *connecté et mutuellement informé* que forment d'emblée les établissements humains dès que s'accroissent les densités ou dès qu'apparaissent les villes (la prédation, le commerce, les échanges);
- iii) les transformations *spatiales et historiques* de ce réseau qui s'enracine dans un territoire ne conservant pas anthropologiquement les mêmes propriétés spatiales au cours du temps.

La variation systématique de la portée des relations urbaines, bien maladroitement dénommée *contraction de l'espace-temps*, est un processus essentiel, qui différencie la dynamique des villes de celle d'autres systèmes dynamiques, et qui confère à la théorie des systèmes de villes sa dimension spécifiquement géographique. Enfin, il faut ajouter, aux processus d'auto-organisation, la spécificité évolutive des systèmes de villes, qui implique que soit également prise en compte la capacité créative des centres urbains, le flux des innovations et la création de richesses nouvelles étant seuls à même d'expliquer la poursuite de l'urbanisation (Pumain, 1997).

C'est par le système de peuplement que passe à la fois l'invention de la nouveauté technique, sociale, culturelle et la résolution du risque de déséquilibre ainsi créé, grâce à l'organisation de sa diffusion. C'est par ce système que s'effectuent la mise à portée du plus grand nombre de la plupart des innovations et l'accès à la modernité. Le système de peuplement diffère cependant des grands systèmes techniques par son auto-organisation. En dépit d'interventions très partielles, sa structure et son évolution ne répondent pas à des objectifs pré-définis, ne résultent pas de réalisations planifiées ni de décisions concertées, et semblent échapper jusqu'à présent à toute velléité de contrôle des opérateurs. C'est la concurrence entre les acteurs attachés aux différents lieux qui produit les importantes régularités

structurelles, l'amortissement de la formation des différences par la diffusion de l'innovation, tandis que la très forte connexité du système contribue à en stabiliser l'évolution. Cependant, l'importance des mécanismes de création, la complexité organisationnelle des niveaux de villes et l'adaptabilité apparentent le système de peuplement aux systèmes vivants plutôt qu'aux systèmes physiques auto-organisés, tandis que les effets réflexifs et d'apprentissage en font indiscutablement un système social.

En quoi réside la capacité d'adaptation? Le système de peuplement remplit à un moment donné des fonctions de contrôle, de desserte, d'irrigation capillaire d'un territoire, en articulant deux échelles essentielles de la vie de relation, qui sont d'une part celle qui constitue les territoires du quotidien formés par les lieux habités et leur environnement immédiat, et d'autre part celle qui forme les territoires du pouvoir politique, culturel ou économique, lesquels sont aussi des lieux fréquentés mais de façon moins habituelle. Les « territoires » en question combinent à des degrés divers une spatialité de la continuité et une spatialité réticulaire. Leurs dimensions correspondent en moyenne à des *durées* admises pour le déplacement, variables certes, mais parmi lesquelles on repère deux seuils, deux ordres de grandeur : l'heure dans la ville; la journée entre les villes. On peut donc établir une correspondance entre ces deux modes de relation des sociétés à leur environnement, des modes de déplacement ayant leur vitesse propre, et les deux échelles d'organisation géographique de l'urbain, de la ville et du système des villes.

La construction progressive d'un système de peuplement de plus en plus hiérarchisé, avec des contrastes de plus en plus grands entre les dimensions et le degré de complexité de ses éléments, est une conséquence de l'adaptation progressive, historique, d'un système initialement bâti en fonction d'une certaine vitesse de circulation et qui s'est transformé pour permettre des vitesses plus grandes. Ce faisant, le système a aussi permis que les sociétés se libèrent progressivement de la dépendance écologique à l'égard des ressources offertes par leur site. Les aléas, les incertitudes menaçant la survie et le développement social s'en sont trouvés réduits, grâce à l'extension considérable des possibilités de substitution et de complémentarité des ressources, sans oublier l'appel possible aux disponibilités de sites de plus en plus éloignés. Les systèmes de peuplement réalisent ainsi une nécessité évolutive, en adaptant constamment la structure spatiale des territoires à la contrainte de réduction des incertitudes de l'environnement immédiat, soit ce que se donnent en permanence pour objectif les sociétés humaines. Ces systèmes sont les instruments privilégiés du processus par lequel l'humanité « transforme l'étendue en espace », imprime peu à peu des propriétés anthropologiquement définies pour réduire les rugosités « naturelles » de la surface de la terre en créant un milieu anthropisé, qui homogénéise les conditions du « savoir habiter » (Reymond, 1981).

L'information concernant la structure des systèmes de peuplement (forme hiérarchique et spécialisations) est au moins en partie connue des acteurs, qui peuvent l'utiliser pour s'y conformer ou pour la contester. On peut se demander jusqu'à quel point cet aspect réflexif, incluant dans l'évolution du système sa représentation, même partielle, est susceptible de différencier assez nettement à l'avenir l'évolution des systèmes de peuplement de celle d'autres systèmes auto-organisés.

À PROPOS DU HASARD ET DU CHAOS

Certaines critiques émises à l'encontre des applications en géographie de l'auto-organisation récussent « l'importance prêtée au hasard [car elle] représente une abdication fâcheuse de la raison, qui renonce ainsi à trouver du sens dans la structuration de l'espace géographique » (Hubert, 1993 : 28).

Deux points doivent ici être discutés. D'une part, le projet de ces travaux n'est pas de produire une théorie sociale, mais d'employer des modèles qui mesurent le degré de vraisemblance d'une description simplifiée d'une évolution et qui utilisent cette possibilité pour des simulations prospectives. D'autre part, il ne s'agit pas de dénier que les comportements des acteurs, des agents géographiques, aient un sens, une signification ou des finalités, si l'on veut, et dont ces personnes ont des représentations, individuelles et collectives, qui peuvent être étudiées au demeurant. Certains de ces comportements sont d'ailleurs pris en compte par les modèles, grâce à des paramètres qui vont par exemple attribuer plus de pouvoir à certains types d'agents qu'à d'autres, du point de vue de la priorité pour l'occupation du sol ou du niveau de mobilité. Il s'agit ensuite d'observer comment, dans certains cas, ces comportements peuvent produire, par leurs interactions et à des échelons géographiques supérieurs, des formes non intentionnelles dont le contenu n'est ni programmé ni même pensé par les individus. Dans ces modèles, le hasard intervient, non pas à titre d'hypothèse quant à l'irrationalité du monde ou à la neutralité du géographe qui l'interprète, mais comme une facilité de calcul, ou plutôt comme un moyen de réduire le coût de l'observation : comme je n'ai pas la possibilité de décrire chacun des comportements individuels dans leur spécificité et leur finalité, je simule leur variabilité par des fluctuations autour d'un comportement, sinon moyen, du moins typique. Au total, si je parviens à reproduire l'évolution de la structure qui m'intéresse (dans le cas présent, la structure macro-géographique) avec une précision suffisante, je peux accepter à ce niveau de simuler par des processus aléatoires l'absence d'information où je me trouve quant à la diversité des acteurs.

À un autre extrême de la pensée, certains s'enflamment pour une vision du monde où régnerait une imprévisibilité totale, au prétexte d'une interprétation élargie et quelque peu littéraire de la « théorie du chaos ». Rappelons que la notion de chaos, dans notre contexte, correspond à celle de chaos déterministe, c'est-à-dire d'un processus contrôlé par des équations différentielles mais dont l'évolution devient imprévisible parce qu'elle dépend très étroitement des conditions initiales. De nombreux auteurs se sont amusés à reproduire des graphiques retraçant ces évolutions bizarres. J'ai indiqué ailleurs (Pumain, 1991) combien ces exercices me paraissaient relever du jeu mathématique. Pour les modèles qui nous occupent ici et qui simulent des dynamiques d'objets géographiques, aucun de ceux que j'ai pu étudier ne produit de comportement chaotique dans des conditions normalement observables.

À titre d'exemple, il est bien connu que l'équation logistique, exprimée comme une équation aux différences, produit du chaos, mais c'est à partir de valeurs d'un paramètre représentant la croissance de la variable et qui équivaldraient à une variation relative de l'ordre de 300 % par unité de temps! Quelle unité géographique a jamais tenu ce record sur une durée suffisante pour qu'on ait envie d'en modéliser

l'évolution? Autre exemple : pour qu'un modèle de changement d'occupation du sol urbain (tel celui de White, 1993) se mette en mal de chaos, il faut que chaque parcelle admette l'installation d'un nouveau commerce ou service à un rythme de l'ordre... de la demi-journée ! Ou encore, le modèle des migrations inter-régionales que nous avons testé avec nos collègues physiciens peut devenir chaotique si on le laisse tourner sur une durée suffisante, c'est-à-dire si l'on suppose que la matrice des flux demeure inchangée pendant... 3000 ans! Autrement dit, le domaine de variation des paramètres nécessaire pour observer du chaos avec ce genre de modèles se situe toujours très au-delà des valeurs observables. Aux échelles où nous travaillons, il semble bien que le chaos déterministe relève de l'artefact mathématique. Interpréter de tels résultats (qui ne sont jamais entièrement explicités dans les multiples articles décrivant ces magnifiques attracteurs et autres solitons) revient donc à peu près au même que de se poser des questions sur ce que devient un modèle économétrique ajustant le revenu des régions sur leur proportion d'agriculteurs, lorsque les valeurs du revenu deviennent négatives, ou lorsque le pourcentage d'agriculteurs dans la région est supérieur à 100 % puisque, on le sait, la droite en tant qu'objet mathématique est, pour sa part, infinie...

Or la prise en compte de la possibilité de simuler certaines évolutions au moyen de modèles d'auto-organisation n'est pas pour autant anodine, dès lors que le caractère non linéaire de la dynamique a été perçu. Plus que le caractère aléatoire du processus, c'est le plus souvent son aspect déterminé qui risque de déconcerter l'action volontaire ou planificatrice. En effet, intervenir dans un processus auto-organisé n'est pas aisé. Une action dans une partie du système en entraîne nécessairement beaucoup d'autres. Par exemple, les réactions locales des villes menacées par les effets de la métropolisation, qu'il s'agisse de la création de technopôles, du marketing urbain ou de la participation à des réseaux locaux ou européens, ont été bien vite imitées et généralisées à la plupart des villes du système, annihilant ainsi le souhait de résister localement aux effets du processus. C'est que la modalité normale de l'évolution de ces entités que constituent les noyaux de peuplement reste la concurrence, la rivalité pour la captation des ressources, et cela depuis les querelles de clocher entre villages jusqu'aux rivalités pour l'acquisition des équipements entre grandes villes, ou encore aujourd'hui l'interception de quelque position-clé dans les réseaux de circulation de l'information.

La puissance des mécanismes d'auto-organisation est ainsi prouvée *a contrario* par les difficultés qu'éprouvent les gouvernements soucieux de modifier des organisations urbaines qui leur paraissent incompatibles avec des objectifs d'équité territoriale ou souhaitant une meilleure efficacité économique, ou encore désireux de mieux affronter une concurrence internationale. Inutile de s'appesantir à ce sujet sur l'effet incertain des politiques menées en vue de réduire en France le poids de l'agglomération parisienne, exemple-type de la ville « primatale » en pays développé. De même, à une autre extrémité de la hiérarchie urbaine, il n'est pas sûr de pouvoir prédire un succès pour la politique des « réseaux de villes » de la DATAR, destinée à désamorcer les effets ruineux des concurrences locales encore vivaces entre des villes moyennes proches et qui pourraient être réunies dans le même bassin de vie.

Constater la force auto-organisatrice du système ne signifie pas cependant qu'il faille abandonner toute action locale et tout espoir de transformation. La connaissance des modalités de l'évolution des systèmes de peuplement n'implique pas la résignation. Elle souligne plutôt l'ampleur et la force des interventions nécessaires pour en infléchir le cours. Si, par exemple, les Européens entendent préserver le patrimoine original que constituent les villes petites et moyennes, dont le grand nombre et la forte densité caractérisent le système de peuplement, ils doivent être prêts à mettre en œuvre des politiques interventionnistes fortes, coûteuses (du moins selon les normes actuelles de comptabilité qui n'évaluent guère les nuisances ni les avantages des cadres de vie), et persévérantes.

CONCLUSION

La théorie de l'auto-organisation ne peut être que très partiellement, et sans doute provisoirement, une théorie pour la géographie. Elle donne un cadre interprétatif à un certain nombre de processus dynamiques transcendants. Elle rend compte, autrement dit, de la formation et de la transformation de certaines structures spatiales observables à l'échelle méso- ou macro-géographique à partir des interactions définies entre des éléments plus petits et très nombreux qui les constituent. Les systèmes contenant peuvent ainsi être décrits à au moins deux niveaux d'observation. Incidemment, la théorie de l'auto-organisation fait comprendre des similitudes entre les dynamiques de certains systèmes complexes et celles, en général non intentionnelles, qui contribuent à l'émergence et au maintien de la forme des objets géographiques. Cette théorie est partiellement validée en géographie dans la mesure où les modèles de dynamique non linéaire qui en sont dérivés permettent de simuler, voire de prédire correctement certains types d'évolution caractéristiques, comme la dynamique centre-périphérie ou l'émergence et la structuration des systèmes de villes.

S'agissant de structures spatiales, la théorie de l'auto-organisation permet de prévoir des localisations ou des formes nouvelles. Mais de toute évidence elle ne permet pas de préciser le contenu ni la signification sociale ou technologique de la nouveauté. Les modèles qui sont dérivés de cette théorie sont, sinon opérationnels, du moins opérationnalisables. Ils permettent de travailler à l'exploration de futurs possibles, en partant de scénarios plus réalistes que ceux généralement issus des spéculations prospectives, car ils incorporent la dynamique passée du système considéré. De nouveaux progrès sont à attendre d'une intégration plus explicite, dans ces modèles, des relations entre les comportements individuels saisis dans leur variété, les interactions entre ces comportements et les transformations des formes spatiales consécutives. La réalisation de modèles dits « multi-niveaux » serait en quelque sorte envisageable (Bocquet-Appel *et al.*, 1996). La relation à établir entre les variables, les catégories qui reflètent les intentions ou les stratégies des individus, ou même tout simplement qui sont pertinentes pour décrire leur comportement, et les variables qui décrivent le niveau des structures agrégées, c'est-à-dire les catégories qui prennent sens à l'échelon des entités géographiques, reste cependant un passage très délicat de ces modélisations.

La théorie de l'auto-organisation appliquée aux systèmes sociaux me paraît ainsi relever de l'instrumentation, mais pas de l'explication. Il faut en particulier se garder d'accorder trop de sens aux connotations sémantiques des termes « auto-organisation » ou encore « théorie du chaos ». Ces expressions sont en fait techniques et forgées dans le cadre d'une description bien précise de systèmes physiques ou de modèles purement mathématiques. Toute extrapolation à une théorie sociale relèverait de la métaphysique et n'aurait pas grand intérêt sur le plan pratique.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN, P.M. (1978) Dynamique des centres urbains. *Sciences et Techniques*, 50 : 15-19.
- (1991) Spatial Models of Evolutionary Systems. In D. Pumain (éd.) *Spatial Analysis and Population Dynamics*. Paris, John Libbey-INED, Congresses and Colloquia, 6 : 147-160.
- (1997) *Cities and Regions as Self-Organizing Systems : Models of Complexity*. London, Gordon and Breach.
- ALLEN, P. et SANGLIER, M. (1979) A Dynamic Model of Growth in a Central Place System. *Geographical Analysis*, 11 : 256-272.
- (1981) Urban Evolution, Self Organisation and Decision-Making. *Environment and Planning*, 13 : 168-183.
- AMSON, J.C. (1975) Catastrophe Theory : A Contribution to the Study of Urban Systems. *Environment and Planning*, 2 : 175-221.
- BATTY, M. et LONGLEY, P. (1994) *Fractal Cities, A Geometry of Form and Function*. London and San Diego, Academic Press.
- BERRY, B.J.L. (1964) Cities as Systems Within Systems of Cities. *Papers of the Regional Science Association*, 13 : 147-163.
- BOCQUET-APPEL, J.P., COURGEAU, D. et PUMAIN, D., édés (1996) *Spatial Analysis of Biodemographic Data*. Paris, John Libbey-INED.
- BURA, S., GUÉRIN-PACE, F., MATHIAN, H., PUMAIN, D. et SANDERS, L. (1996) Multi-Agent Systems and the Dynamics of a Settlement System. *Geographical Analysis*, 2 : 161-178.
- CASSETTI, E. (1991) Testing Catastrophe Hypotheses. *Socio-spatial Dynamics*, 2 (2) : 65-80.
- CLARKE, M. et WILSON A.G. (1983) The Dynamics of Urban Spatial Structure : Progress and Problems. *Journal of Regional Science*, 23 : 1-18.
- COUCLELIS, H. (1985) Cellular Worlds : A Framework for Modelling Micro-Macro Dynamics. *Environment and Planning, A*, 17 : 585-596.
- DENDRINOS, D.S. (1984) The Structural Stability of the US Regions : Evidence and Theoretical Underpinnings. *Environment and Planning, A*, 16 : 1433-1443.
- DENDRINOS, D.S. et MULLALY, H. (1981) Evolutionary Patterns of Urban Populations. *Geographical Analysis*, 13 : 328-344.
- (1985) *Urban Evolution : Studies in the Mathematical Ecology of Cities*. Oxford, Oxford University Press.

- FIK, T.J. et MULLIGAN, G.F. (1990) Spatial Flows and Competing Central Places : Towards a General Theory of Hierarchical Interaction. *Environment and Planning A*, 22 : 527-549.
- FOURNIER, R. (1990) *Le modèle CARPE*. Université de Paris X Nanterre, thèse de 3^e cycle en économie.
- FRANKHAUSER, P. (1994) *La fractalité des structures urbaines*. Paris, Anthropos.
- HAAG, G. (1984) A Dynamic Model for the Migration of Human Populations. In D.A. Griffith et A.C. Lea (éds) *Evolving Geographical Structures*, Nato Advanced Institute Series, Den Haag, Martinus Nijhoff, pp. 24-61.
- HAAG, G. et WEIDLICH, W. (1984) A stochastic theory of interregional migration. *Geographical Analysis*, 16 : 331-357.
- HAAG, G., MUNZ, M., PUMAIN, D., SANDERS, L. et SAINT-JULIEN, T. (1992) Interurban Migration and the Dynamics of a System of Cities. *Environment and Planning, A*, 24 : 181-198.
- HAKEN, H. (1977) *Synergetics, an Introduction*. Berlin, Springer, 2nd ed.
- HARRIS, B. et WILSON, A.G. (1978) Equilibrium Values and Dynamics of Attractiveness Terms in Production-Constrained Spatial Interaction Models. *Environment and Planning, A*, 10 : 371-88.
- HUBERT, J.P. (1993) *La discontinuité critique*. Paris, Presses de la Sorbonne.
- KREMENEK, A.J. et ESPARZA, A. (1973) Modelling Interaction in a System of Markets. *Geographical Analysis*, 4 : 354-368.
- LEPETIT, B. et PUMAIN, D., éds (1993) *Temporalités urbaines*. Paris, Anthropos.
- LOWRY, I. (1964) *A Model of Metropolis*. Santa Monica, RM. 4035 RC. Rand Corporation.
- MAY, R.M. (1976) Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics. *Nature*, 261 : 459-467.
- MEES, A.I. (1975) The Revival of Cities in Medieval Europe. An Application of Catastrophe Theory. *Regional Science and Urban Economics*, 5 : 403-425.
- PAPAGEORGIOU, G.J. (1980) On Sudden Urban Growth. *Environment and Planning, A*, 12 : 1035-1050.
- PRED, A. (1977) *City Systems in Advanced Societies*. London, Hutchison.
- PRIGOGINE, I. et STENGERS, I. (1979) *La Nouvelle Alliance*. Paris, Gallimard.
- PUMAIN, D. (1991) Humeur de chaos. *L'Espace géographique*, 4 : 309-310.
- (1994) Les systèmes de villes. In A. Bailly, R. Ferras et D. Pumain (éds) *Encyclopédie de géographie*. Paris, Economica, pp. 439-462.
- (1997) Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace géographique*, 2 : 119-134.
- PUMAIN, D. et SAINT-JULIEN, T. (1979) Les transformations récentes du système urbain français. *L'Espace Géographique*, 3 : 203-211.
- PUMAIN, D., SANDERS, L. et SAINT-JULIEN, T. (1989) *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica.
- REYMOND, H. (1981) Une problématique théorique de la géographie : plaidoyer pour une chorotaxie expérimentale. In H. Isnard, J.B. Racine et H. Reymond (éds) *Problématiques de la Géographie*. Paris, Presses Universitaires de France.
- ROSSER, J.B. (1991) *From Catastrophe to Chaos : A General Theory of Economic Discontinuities*. Boston, Kluwer.

-
- SANDERS, L. (1992) *Système de villes et synergétique*. Paris, Anthropos.
- THOM, R. (1974) *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, Paris, Christian Bourgeois,
- WEGENER, M. (1994) Operational Urban Models, State of the Art. *Journal of the American Planning Association*, 60(1), Winter.
- WEIDLICH, W. et HAAG, G. (1988) *Interregional Migration, Dynamic Theory and Comparative Analysis*. Heidelberg, Springer Verlag.
- WHITE, R.W. (1977) Dynamical Central Place Theory. *Geographical Analysis*, 9 : 226-243.
- (1978) The Simulation of Central Place Dynamics : Two Sector Systems and the Rank Size Rule. *Geographical Analysis*, 10 : 201-208.
- (1993) *Chaotic Behaviour and the Self-Organization of Urban Retail Systems*. Brussels working papers on spatial analysis, serie A, n° 3.
- WILSON, A.G. (1981) *Catastrophe Theory and Bifurcation : Application to Urban and Regional System*. London, Croom Helm.
- ZHANG, W.B. (1990) Stability Versus Instability in Urban Pattern Formation. *Socio-Spatial Dynamics*, 1 : 41-56.