



HAL
open science

Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain

Denise Pumain

► **To cite this version:**

Denise Pumain. Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain. Cahiers de géographie du Québec, 1998, 117, pp.349-366. halshs-01565291

HAL Id: halshs-01565291

<https://shs.hal.science/halshs-01565291>

Submitted on 19 Jul 2017

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

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

Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain

Denise Pumain
 Professeur à l'Université Paris I
 Directeur, laboratoire P.A.R.I.S.-E.H.GO (CNRS et Université Paris I)
 13 rue du Four, 75006 Paris
 pumain@paris.msh-paris.fr

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.

1 Le changement dans les systèmes spatiaux

Face à l'éventualité d'une analyse en termes de mode scientifique, 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, 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).

1.1 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, 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 les présentent insistent généralement sur la rupture épistémologique que ces théories ont marqué 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, et celui, microscopique, des éléments très nombreux qui le composent. 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 de sa structure 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 en principe 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. Ce faisant, elle invite 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 de relatives discontinuités par rapport à ce qui serait une simple combinatoire des arrangements de tous les états possibles 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 moments de plus ou moins grande stabilité coupés 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 ainsi 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 de prévision du changement.

1.2 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 B. Berry (*cities as systems within systems of cities*, 1964), les géographes étudient les villes à trois niveaux principaux d'observation, qui sont les acteurs urbains (individus, ménages, entreprises, institutions), les villes (conçues comme des entités ayant un certain degré d'autonomie et de permanence), et les 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).

A 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, 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 sa structure hiérarchique (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, stagnation, décroissance démographique, ou des changements de son rang dans la hiérarchie des tailles, ou bien encore les modifications de son profil socio-économique, qui sont tantôt en avance, tantôt en phase ou en retard sur une transformation commune (Pumain, Saint-Julien, 1979). Les

fluctuations (ou passage des éléments d'un état à un autre) sont encore 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.

A 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.

1.3 Auto-organisation et explication

La notion d'auto-organisation, transposée aux systèmes urbains, 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 en termes d'une fonction à optimiser, mais que la structure est 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 qu'elles ne constituent pas le déterminant essentiel de la structure et de l'évolution des systèmes de peuplement. Des organisations volontaires 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 leurs évolutions.

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, décision 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 aussi bien au niveau 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, et 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. La concurrence entre les acteurs localisés dans les villes, qui est le corollaire de la connexité des réseaux urbains, conduit par agrégation à une concurrence entre les villes du système des villes, et 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 un changement de perspective sur le changement, qui voudrait éviter de n'expliquer l'événement qu'à 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, Sanglier, 1981, Weidlich, Haag, 1988), ou aux villes (Allen, 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 leur trajectoire particulière. On admet que les processus soient formalisables, que les objets géographiques puissent avoir une « dynamique banale » dans une tendance historique qui demeure irréversible.

2 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 bien pour explorer des représentations plus complètes des systèmes urbains.

2.1 Les discontinuités de la croissance urbaine

Les équations de la théorie mathématique des catastrophes de R. 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-Age 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 logarithmique 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 XVIIe et le Xxe siècle en termes de 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.

2.2 La dynamique relative d'entités spatiales concurrentes

La dynamique d'entités géographiques appartenant à un même territoire (quartiers d'une ville, régions d'un Etat, villes d'un système de villes, centre et périphérie etc...) montre souvent, par delà un développement (ou un déclin) d'ensemble, qui affecte plus ou moins toutes les parties d'un système (et qui serait expliqué par exemple par la théorie de la diffusion spatiale des innovations), 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 celle des autres. Le modèle proie-prédateur de Volterra-Lotka a été souvent appliqué pour simuler cette dynamique relative d'unités spatiales concurrentes. Dendrinis (1984) et Dendrinis et Mullaly (1985) l'ont employé de plusieurs façons pour simuler l'évolution différentielle des populations et des revenus de villes et de régions, tandis que d'autres (Orishimo, 1987, 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 les équations maîtresses, qui explicite la relation entre le comportement des individus et celui du système.

2.3 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, développés par l'école de Bruxelles (P. Allen, 1978) et l'école de Leeds (Harris, 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), sur la ville de Leeds (Clarke, Wilson, 1983) ou encore à des régions, en Belgique, aux Pays-Bas, aux Etats-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, 1993, Batty, Longley, 1994).

2.4 Les modèles dynamiques de systèmes de villes

Plusieurs auteurs ont tenté des modélisation dyaniques de la hiérarchie des lieux centraux. Elle est déduite dans certains modèles dynamiques à partir 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, 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 probabilité individuelle de migrer et 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, vois aussi l'article de L. Sanders dans ce numéro).

3 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). En fait, 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.

3.1 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 plus loin par Lena Sanders à propos de la cybernétique) la modélisation permet des projections, des estimations, de tester 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 nombre de circonscriptions différents (Weidlich, Haag, 1988), ce que ne permettent pas les modèles classiques d'ajustement des migrations. En outre, on peut mesurer un écart entre une configuration existante et celle que produirait un certain système d'échanges, décrit par une certaine matrice de migrations. Enfin, comparativement à d'autres types de modélisation dynamique des mouvements migratoires, ce modèle a l'intérêt de donner des

trajectoires stables, de ne pas trop 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, ou bien si les liens inter établissements s'affaiblissent, si les prix du pétrole baissent, ou comment des processus ségrégatifs peuvent s'imposer, à partir d'une modification des "préférences" affichées par les acteurs pour la composition sociale de leur voisinage; ou encore, on peut se demander à partir de quel seuil critique un investissement dans un quartier urbain (par ex un centre commercial) peut établir un nœud, nouveau et persistant, de centralité, 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, alors il faut bien évidemment 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, 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 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. Elle explore les conditions et les modalités de la transformation des structures spatiales.

3.2 Vers une théorie évolutive

De la confrontation de ces observations 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, 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.

Cette théorie n'est pas une théorie du changement social en ce sens qu'elle n'explique pas pourquoi on passe de telle forme d'organisation de la production ou de la société à telle autre. Elle se veut une théorie du changement spatial (ou une contribution à l'interprétation du changement spatial dans une théorie sociale), c'est-à-dire 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 engendré 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: la *transition urbaine* d'une part, 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*; 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); et enfin dans 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 prise en compte, aussi, 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 lui que s'effectue 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. L'importance des mécanismes de création, la complexité organisationnelle des niveaux de villes, l'adaptabilité du système l'apparentent cependant davantage aux systèmes vivants 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, qui 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, la ville et le 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

vitesse plus rapides. Ce faisant, le système a aussi permis que les sociétés se libèrent progressivement de la dépendance écologique locale, à l'égard des ressources offertes par leur site, et que soient réduits les aléas, les incertitudes menaçant leur survie et leur développement, en élargissement considérablement les possibilités de substitution et de complémentarité de ressources, par l'appel à celles 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, que se donnent en permanence pour objectif les sociétés humaines. Ils 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.

3.3 A propos du hasard et du chaos

Certaines critiques émises à l'encontre des applications en géographie de l'auto-organisation récusent « 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, p. 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, dont ces personnes ont des représentations, individuelles et collectives, qui peuvent être étudiées par ailleurs. 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, en termes de priorité pour l'occupation du sol ou de niveau de mobilité. Il s'agit ensuite d'observer comment, dans certains cas, ces comportements peuvent produire, par leurs interactions, 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.

A 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, 1992) combien ces exercices me paraissaient relever d'abord du jeu mathématique. En effet, 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. A 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 qui équivaudraient 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...3000ans ! 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, elle, 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 aperçu. 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 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 vivace entre

des villes moyennes proches 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, mais souligne l'ampleur et la force des interventions nécessaires pour en infléchir le cours. Ainsi, si 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 oeuvre 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 transcalaires, autrement dit elle rend compte 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, dans des systèmes qui peuvent ainsi être décrits à au moins deux niveaux d'observation. Ce faisant, la théorie de l'auto-organisation fait comprendre certaines 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 permet de prévoir des localisations ou des formes nouvelles mais évidemment pas de préciser le contenu ni la signification sociale ou technologique de la nouveauté. Les modèles qui en sont dérivés 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 (Bocquet-Appel et al., 1996).

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, contrairement à ce que certains sont tentés de faire, se garder d'accorder trop de sens aux connotations sémantiques des termes « auto-organisation » ou encore « théorie du chaos », qui sont en fait des expressions techniques forgées dans le cadre d'une description bien précise de systèmes physiques, ou de modèles purement mathématiques. Toute extrapolation en termes de théorie sociale relèverait de la métaphysique et n'aurait pas grand intérêt sur le plan pratique.

Références

Allen, P.M.: 1978, 'Dynamique des centres urbains', *Sciences et Techniques* 50, 15-19.

- Allen P.M. 1991, Spatial models of evolutionary systems, in Pumain D. (ed) *Spatial Analysis and Population Dynamics*, John Libbey-INED, congresses and Colloquia, 6, 147-160.
- Allen P.M. 1997, *Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity*. London, Gordon and Breach.
- Allen, P. and M. Sanglier: 1979, 'A dynamic model of growth in a central place system', *Geographical Analysis* 11, 256-272.
- Allen, P. and M. Sanglier: 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. Longley P. 1994, *Fractal cities, a geometry of form and function*. London and San Diego, Academic Press.
- Bocquet -Appel J.P. Courgeau D. Pumain D. (eds) 1996, *Spatial Analysis of Biodemographic data*. Paris, John Libbey-INED, 367 p.
- Bura S. Guérin-Pace F. Mathian H. Pumain D. Sanders L. 1996, Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 2, 161-178.
- Casetti E. 1991, Testing Catastrophe Hypotheses. *Socio-spatial dynamics*, 2, 2, 65-80.
- Clarke, M. and A.G. Wilson: 1983a, 'The dynamics of urban spatial structure: progress and problems', *Journal of Regional Science* 23, 1-18.
- Couclelis, H.: 1985, 'Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics', *Environment and Planning* A17, 585-596.
- Dendrinis, D.S.: 1984, 'The structural stability of the US regions: evidence and theoretical underpinnings' *Environment and Planning* A16, 1433-1443.
- Dendrinis, D.S. and H. Mullaly: 1981, 'Evolutionary patterns of urban populations' *Geographical Analysis* 13, 328-344.
- Dendrinis D.S. Mullaly H. 1985, *Urban Evolution: Studies in the Mathematical Ecology of Cities*. Oxford, Oxford University Press.
- Fik T.J. 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 3e 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 Griffith D.A. and Lea A.C.: *Evolving Geographical Structures, Nato Advanced Institute Series*, Martinus Nijhoff, Den Haag, 24-61.
- Haag, G. and W. Weidlich: 1984, 'A stochastic theory of interregional migration', *Geographical Analysis* 16, 331-357.
- Haag G. Munz M. Pumain D. Sanders L. 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. 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.
- Lepetit B. Pumain D. (eds) 1993, *Temporalités urbaines*. Paris, Anthropos.
- 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. and I Stengers: 1979, *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard.
- Pumain D. 1997, Pour une théorie évolutive des villes. *L'Espace Géographique*.
- Pumain D. Saint-Julien T. 1979, Les transformations récentes du système urbain français. *L'Espace Géographique*, 3, 203-211.
- Pumain, D., L. Sanders and T. Saint-Julien: 1989, *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica.
- Reymond, H.: 1981, 'Une problématique théorique de la géographie: plaidoyer pour une chorotaxie expérimentale', in Isnard H., Racine J., Reymond H. (ed.) *Problématiques de la Géographie*, P.U.F., Paris.
- Rosser J.B. 1991, *From Catastrophe to Chaos: a general Theory of Economic Discontinuities*. Boston, Kluwer.
- Sanders L. 1992, *Système de villes et synergie*. Paris, Anthropos.
- Thom, R.: 1974, *Modèles Mathématiques de la Morphogénèse*, Christian Bourgeois, Paris
- Wegener M. 1994, Operational Urban Models, State of the Art. *Journal of the American Planning Association*, 60, 1, Winter.
- Weidlich W. 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.
- White, R.W.: 1978, 'The simulation of central place dynamics: two sector systems and the rank size rule', *Geographical Analysis* 10, 201-208.
- White, R.W.: 1983, '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*, Croom Helm, London.
- Zhang W.B. 1990, Stability versus instability in urban pattern formation. *Socio-spatial dynamics*, 1, 41-56.