

OU EN EST L'ANALYSE DES SYSTÈMES EN GÉOGRAPHIE ?

Yves GUERMOND

Résumé

L'analyse des systèmes fut essentiellement centrée sur les dynamiques dans la modélisation de l'activité et dans la complexité des interrelations entre les séries de variables. Les trois notions les plus fondamentales dans cette approche sont l'effet rétroactif, les bifurcations et les processus multiscalaires. Un modèle explicatif du système peut être modifié par des interférences à un niveau de décision supérieur ou par des actions à un niveau inférieur (l'individualisme méthodologique). La complexité croissante du processus de modélisation doit prendre en compte l'incertitude et l'émergence de nouvelles configurations spatiales aléatoires qui mènent à un projet de modélisation incrémentale.

Mots-clés

Analyse des systèmes, modélisation, complexité.

Abstract

The main point in system analysis has been to focus on dynamics in the modelling activity and on the complexity of the interrelations between the sets of variables. The three notions of retrospective effect, branching off and multilevel process are the fundamentals in this approach. The explanation system may be modified by interferences with a superior decision level, or by actions at an inferior scale (the "methodological individualism"). The growing complexity of the modelling process must take into account the uncertainty and the emergence of new spatial patterns at random, which leads to a project of an incremental modelling process.

Keywords

System analysis, modelling, complexity.

I. DE L'ANALYSE DES SYSTÈMES À LA MODÉLISATION DE LA COMPLEXITÉ

Le développement de l'analyse de système en géographie dans les années 80 correspondait au souhait d'introduire des processus dynamiques dans une approche géographique qui était restée jusqu'alors essentiellement descriptive et statique. Cette dynamique pouvait certes être introduite dans les « modèles classiques » : on peut dynamiser le modèle de Von Thünen en faisant varier les prix du marché ou les coûts de transport, ou le modèle de Christaller en faisant varier la portée des services, ou encore celui de Wilson en introduisant, par exemple, un accroissement de taille d'un hypermarché dans un modèle de concurrence spatiale. Cependant, cette dynamisation était une sorte de « bricolage » de modèles qui n'étaient pas réellement conçus pour cela.

Au contraire, les modèles systémiques reposaient sur la volonté de reproduire des processus. La figure 1 en four-

nit une illustration simple, maintenant traditionnelle : on cherche à y expliquer la formation de la fragmentation spatiale urbaine et on reconnaît deux éléments explicatifs importants mais qui agissent au travers d'un système très complexe d'interactions entre l'environnement familial et social, l'adaptation au marché du travail, les politiques urbaines. Ce système d'interactions peut être pris comme une « boîte noire », mais c'est le rôle du chercheur de tenter d'en démêler la complexité.

On peut dire ainsi que les deux éléments qui caractérisent l'approche systémique sont l'analyse dynamique et la complexité (qui ne veut pas dire « complication » !...), mais on peut remarquer que, portant sur le fonctionnement global d'un processus, elle souffre d'une difficile prise en compte des phénomènes d'interaction spatiale : son adaptation aux besoins de la géographie ne va pas de soi. Le célèbre modèle de Forrester illustre bien cette faiblesse géographique.

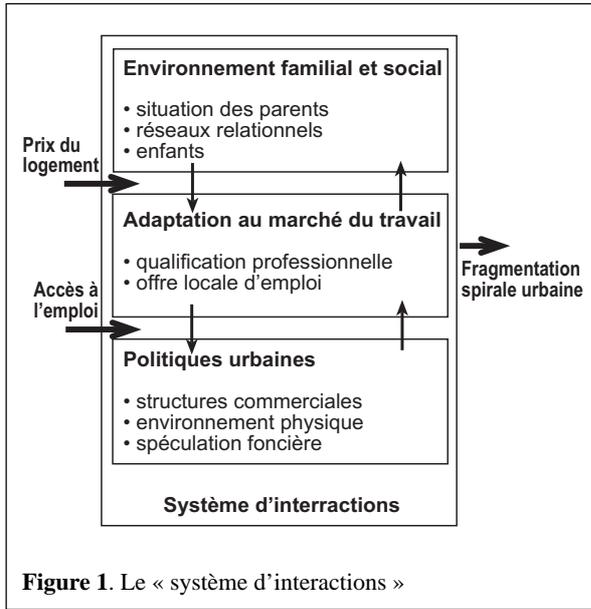


Figure 1. Le « système d'interactions »

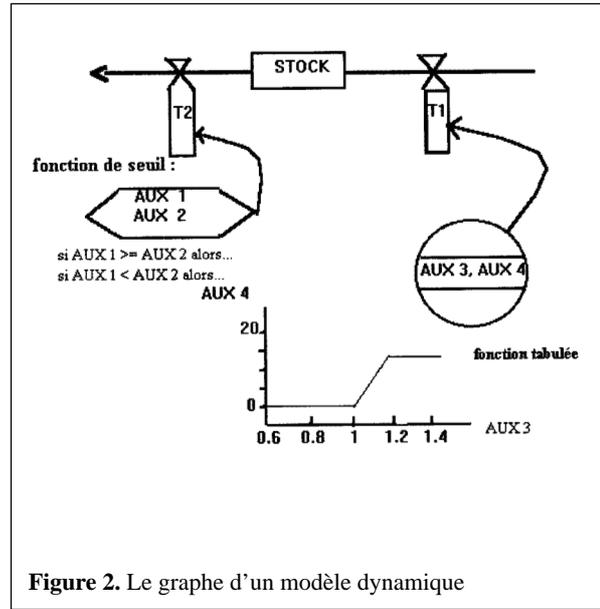


Figure 2. Le graphe d'un modèle dynamique

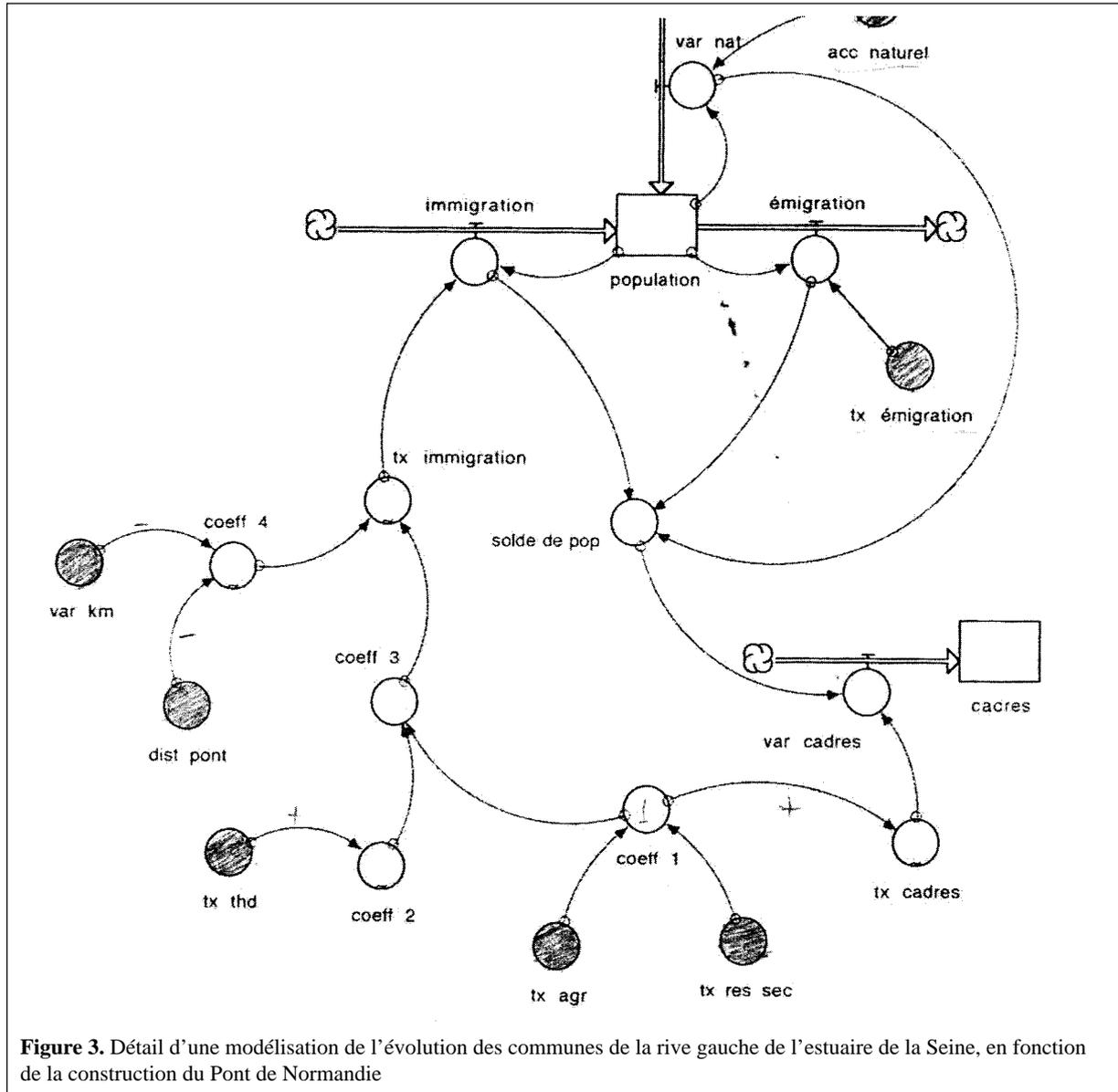


Figure 3. Détail d'une modélisation de l'évolution des communes de la rive gauche de l'estuaire de la Seine, en fonction de la construction du Pont de Normandie

La figure 2 est un peu l'image emblématique de la démarche systémique : pour les principaux éléments du système, les variations de stock sont commandées par des « vannes » agissant sur les flux d'entrée et de sortie (par exemple les naissances et les décès, les immigrants et les émigrants...).

Les « vannes » d'entrée et de sortie sont elles-mêmes pilotées par des variables auxiliaires qui peuvent opérer simplement comme des fonctions de seuil ou bien des fonctions tabulées. Ces variables auxiliaires dépendent elles-mêmes de l'évolution d'autres variables, selon un système très complexe, comme le montre la figure 3, qui tente d'explicitier les évolutions démographiques des communes de la rive gauche de l'estuaire de la Seine en fonction de leur composition socio-professionnelle actuelle, de leur distance à la ville du Havre, du gain de temps de trajet par rapport à la situation antérieure...

À l'examen de cette figure 3, il va de soi qu'il s'ensuit des dynamiques non linéaires puisque le comportement d'ensemble d'un système complexe ne peut se réduire à la somme des comportements moyens de ses constituants. Ainsi naît l'idée de l'imbrication de plusieurs niveaux d'organisation, sur laquelle on reviendra. Des propriétés émergent au niveau macro alors qu'elles ne sont pas directement observables au niveau des constituants élémentaires du système : on peut dire, selon la formule consacrée, que « le tout est plus que les parties... ».

Il faut toutefois prendre garde à ces formulations à la mode qui risquent de faire perdre de vue les enjeux d'une recherche approfondie et sérieuse. Le Programme « Systèmes complexes en Sciences Humaines et Sociales » du CNRS français affirmait ainsi péremptoirement en 2003 qu'*un système complexe a un comportement holistique qui rend vaine toute tentative d'analyse par une découpe en sous-systèmes plus simples*. Le désir de briller intellectuellement peut conduire les chercheurs, même les plus chevronnés, à des propos inconséquents : il est évident qu'une symphonie ou un quatuor sont différents et plus « complexes » que chaque séquence de mesures, instrument par instrument : le « tout » est bien plus que les parties mais c'est l'imbrication (non pas l'addition) de ces motifs simples qui rend compte de la complexité de l'ensemble. Leur analyse n'est évidemment pas « vaine ».

II. RÉTROACTION, BIFURCATION ET INTERACTIONS D'ÉCHELLES

À partir de ce qu'on vient de voir sur « l'analyse des systèmes » on peut dégager les trois éléments principaux qui caractérisent la « modélisation de la complexité ».

A. La rétroaction

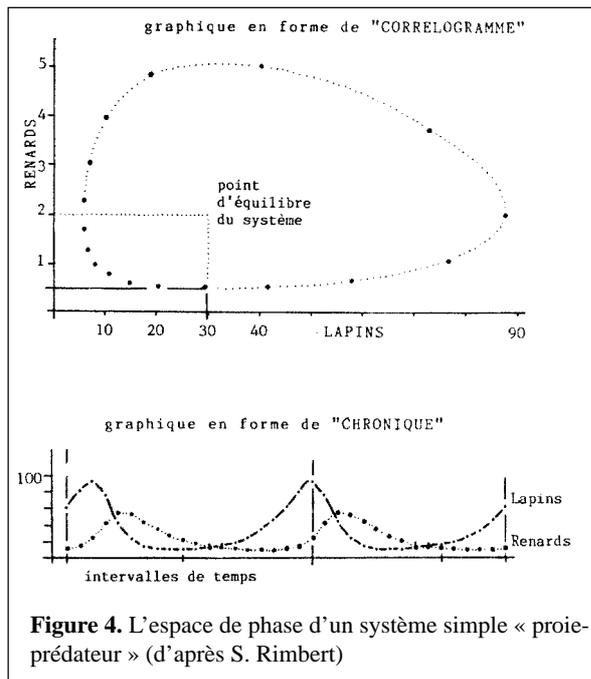
La figure 3 fait apparaître le phénomène de rétroaction : l'évolution démographique d'une commune produit un « choc en retour » sur les périodes suivantes ; on a une boucle qui « revient en arrière » et agit sur l'immigration. On pourrait citer aussi les ajustements actuellement nécessaires au vieillissement de la population européenne par une élévation de l'âge de la retraite ou bien par un changement d'attitude de l'opinion envers le recours à l'immigration.

Il faut noter que les mécanismes de rétroaction peuvent contribuer soit à maintenir la stabilité d'un système (on parlera de rétroactions « positives »), soit à accroître les déséquilibres (rétroactions « négatives »). Ces déséquilibres ne sont pas forcément « négatifs » pourtant, car ce sont eux qui peuvent permettre le changement et l'apparition de nouvelles fonctions. Ce pourrait même être dans ces « interactions négatives » que se trouverait la définition du « progrès », si leur résultat peut être considéré comme « positif » socialement, moralement ou économiquement. La densité urbaine, par exemple, peut, si elle diminue, permettre la stabilité d'un ensemble urbain : il n'y a pas de changement. Si au contraire elle augmente (par immigration ou par bilan naturel), elle peut provoquer, par « rétroaction négative », une asphyxie des centres urbains, la surpopulation, l'engorgement des transports, mais elle peut aussi être à l'origine de nouvelles formes d'urbanisme et de déconcentration urbaine, d'une nouvelle forme de vie sociale.

B. Les bifurcations

Le deuxième « élément clé » de la modélisation de la complexité est la prise en compte des bifurcations. Prenons par exemple un système simple, tel que le modèle « proie-prédateur », à deux variables. On sait que, dans « l'espace de phase », « l'attracteur » le plus fréquent est un « cycle limite », qui rend compte de la diminution régulière des proies à mesure de l'accroissement du nombre de prédateurs, et vice-versa (fig. 4 p.s.).

Cet attracteur simple peut évidemment être modifié par des bifurcations, par exemple l'arrivée (de l'extérieur) de nouvelles proies ou de nouveaux prédateurs, ou bien la découverte, par les proies, de nouveaux moyens de protection, ou encore le perfectionnement des méthodes des prédateurs. Ces bifurcations peuvent faire l'objet de simulations expérimentales, mais la partie strictement scientifique de la recherche se limite à la comparaison des évolutions passées avec la réalité. Si l'on admet qu'un modèle scientifique est un outil d'investigation des évolutions vérifiables, on peut estimer que la prévision d'une évolution à venir est du domaine de la réflexion intellectuelle, s'inspirant certes avec profit des



simulations, mais sortant du domaine propre du chercheur. Il s'ensuit qu'un modèle scientifique n'est pas un outil prioritairement prévisionnel.

À tout moment, des interventions extérieures au système peuvent avoir lieu et c'est pourquoi un « modèle explicatif » ne peut pas être figé, mais il doit être constamment réajusté (d'où l'idée d'une « modélisation incrémentale », comme on parle maintenant d'une « gestion incrémentale »). Notons que les bifurcations sont fréquentes dans les systèmes géographiques, mais ce ne sont pas des « catastrophes ». Le terme de « théorie des catastrophes » est, en effet, assez impropre. Une petite décision administrative, par exemple le nouveau tracé d'une voie rapide ou l'implantation d'une nouvelle salle multiplexe, peut modifier l'évolution urbaine d'une façon qui n'était pas « prévisible » à partir de l'évolution antérieure : on peut bien alors parler d'une « bifurcation ».

Peter Allen, dans le livre de 1984 sur l'Analyse de Système en géographie, s'était amusé à montrer le rôle des bifurcations dans le jeu de l'origami (fig. 5) : à partir de

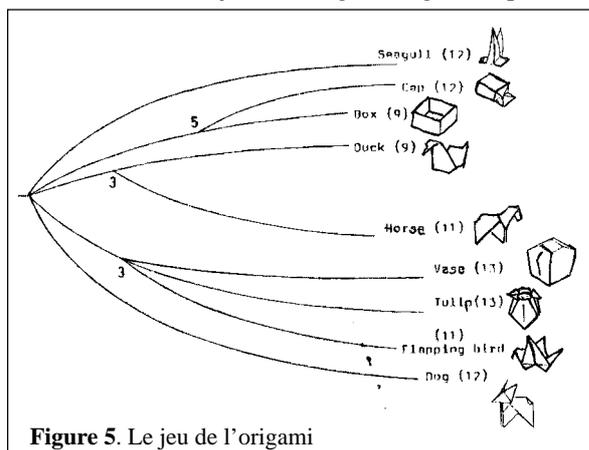


Figure 5. Le jeu de l'origami

certaines bifurcations, certaines évolutions deviennent impossibles et si, à la fin, le nombre de plis donne bien une « mesure » de la complexité, il est impossible de déduire l'évolution de la construction de la figure à partir simplement du nombre et de la forme des plis si on ne connaît pas les bifurcations.

C. L'interaction entre les échelles

Les nouvelles propriétés peuvent aussi être issues des autres niveaux avec lesquels le système est en interaction.

1. Les modifications d'un système explicatif peuvent provenir d'événements intervenus à un niveau supérieur

On peut voir en permanence les conséquences considérables que de « petites » variations des cours du pétrole peuvent avoir sur des économies locales. On connaît aussi les conséquences de la chute du Mur de Berlin sur l'évolution du réseau ferroviaire et routier allemand.

On rencontre fréquemment cette évolution « multiscalaire » dans l'analyse urbaine. Dans une modélisation de l'évolution de l'utilisation du sol urbain à Rouen, par le modèle *Spacelle*, l'influence de la création de grands axes de circulation urbaine est évidente (fig. 6). Or, cette modélisation du réseau de voirie répond à des règles totalement différentes de celles qui ont été établies pour l'évolution, par contiguïté, de l'automate cellulaire : elles dépendent des conditions régionales, voire nationales, de la circulation. Il a donc été nécessaire d'introduire ces nouveaux axes périodiquement, de l'extérieur, dans la simulation.

2. Les modifications peuvent provenir aussi d'un processus développé à une échelle inférieure

On connaît sur ce point le fameux « modèle de Schelling » (fig. 7 p.10).

Un espace hétérogène est donné au départ, sur lequel des populations culturellement différentes sont réparties de façon aléatoire :

- les personnes se regroupent ou s'éloignent en confrontant « leurs valeurs » à celles de leurs voisins ;
- quand une personne est au contact de personnes partageant « les mêmes valeurs », elle reste sur place ;
- si ces valeurs culturelles sont différentes, elle change de lieu de vie.

Ainsi, la ségrégation est la conséquence des interactions personnelles. Elle n'est ni voulue, ni organisée : un Automate Cellulaire (A.C.) crée la ségrégation spatiale avec la seule contrainte d'un contact.

Cette idée, lorsqu'elle est considérée seule, conduit cer-

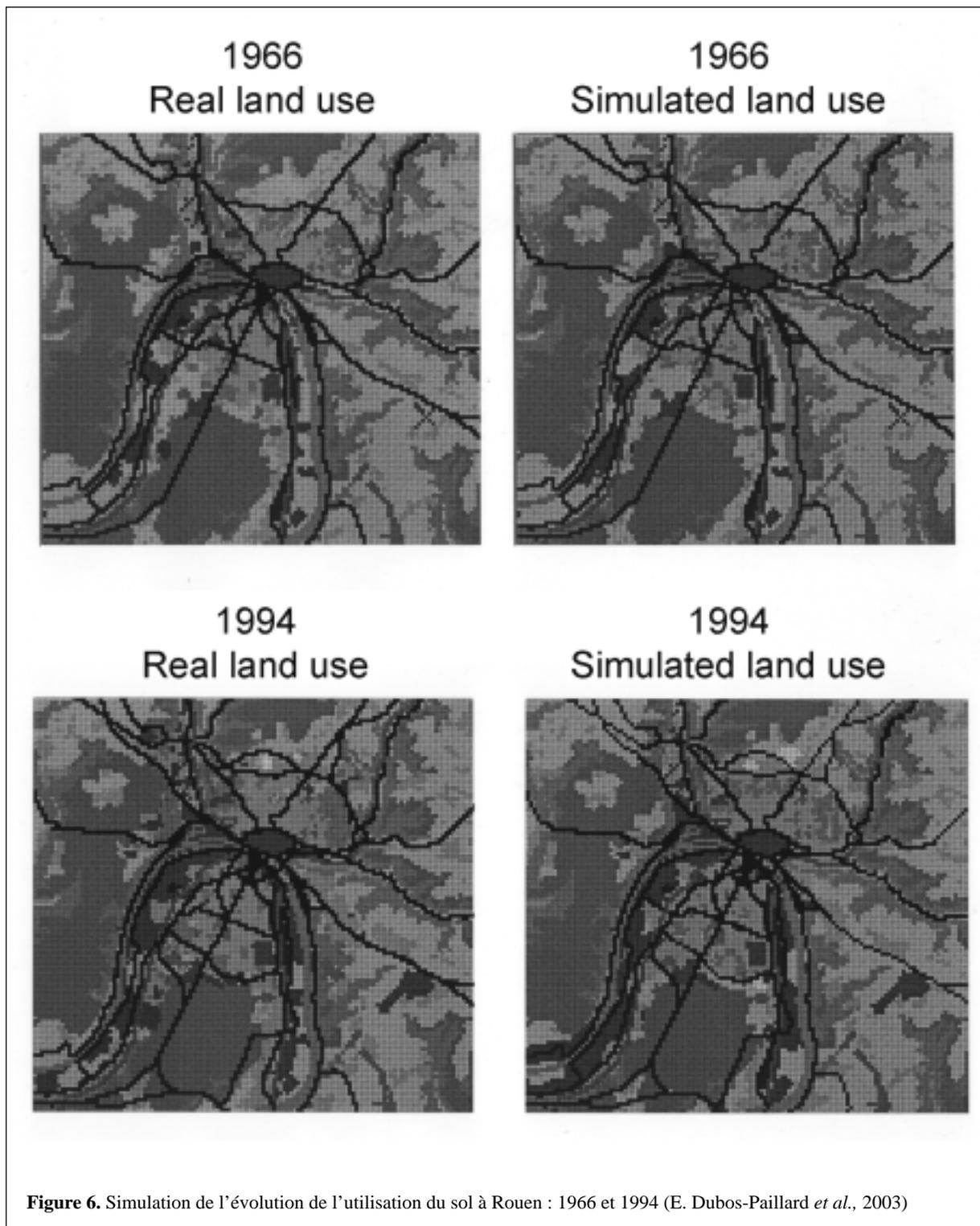


Figure 6. Simulation de l'évolution de l'utilisation du sol à Rouen : 1966 et 1994 (E. Dubos-Paillard *et al.*, 2003)

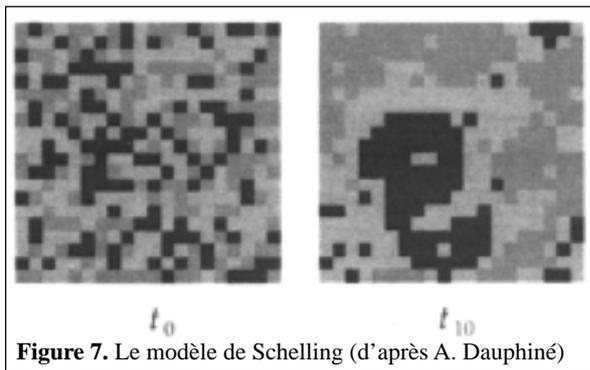


Figure 7. Le modèle de Schelling (d'après A. Dauphiné)

tains chercheurs à travailler dans la perspective d'un « individualisme méthodologique » qui présente l'intérêt, selon eux, de relier les analyses sociologiques sur l'individu et la société aux analyses géographiques sur les ensembles spatiaux : au « départ » d'un système intervient le comportement des agents divers qui le composent. Le changement social ne serait alors que la résultante d'un ensemble d'actions individuelles... C'est la vision « libérale » que Marx condamnait chez Ricardo, comme le rappelle Augustin Berque (2005).

L'individualisme méthodologique peut donc susciter quelques réserves. Les structures émergentes rétroagissent en effet sur les individus : les comportements individuels mènent à la construction de structures spatiales mais, à leur tour, ces structures exercent un effet de rétroaction sur les comportements. Les quartiers d'une ville se constituent certes en fonction de la localisation des premiers habitants, mais la composition du quartier exerce une influence sur les prix, ce qui provoque une attraction ou une répulsion pour les différentes catégories de nouveaux arrivants. Par ailleurs, il est évident que les individus inscrivent leur action dans un contexte plus large que seulement leur ménage : la famille, le groupe social, l'emploi, la politique urbaine... Enfin, des « effets dominos » résultent des actions individuelles et provoquent facilement des réactions d'un espace sur les espaces voisins, qui peuvent être difficilement modélisables à partir des seules analyses des comportements individuels.

III. DÉTERMINISME ET COMPLEXITÉ

Parvenus à ce stade, il est bon d'entreprendre un schéma d'ensemble.

La figure 8 tente de montrer comment les modèles peuvent s'ajuster à la réalité selon une complexité croissante. Les modèles les plus simples sont construits sur des relations fonctionnelles entre les variables (chaque relation implique une conséquence et une seule). Ces relations peuvent être linéaires ou non linéaires et elles conduisent à un fonctionnement régulier prévisible. Les relations non-linéaires peuvent conduire à une certaine forme d'auto-organisation, comme dans le modèle de Peter Allen, par exemple, mais dans une perspective

monoscalaire, ce qui limite les possibilités d'émergence en dehors des règles fixées initialement pour le modèle. Ces relations non linéaires peuvent aboutir aussi à un « chaos déterministe », c'est-à-dire construit par des relations déterministes (mais aux résultats non prévisibles) entre les variables. Enfin, un fonctionnement organisé à une échelle supérieure peut influencer sur le niveau modélisé et en modifier l'évolution, éventuellement même selon un processus stochastique dans lequel le travail du chercheur est évidemment de tenter de réduire au maximum la part d'aléatoire, quand c'est possible.

A. L'aléatoire...

Il n'existe pas de « hasard pur » qui serait opposé au « construit » ou au « structuré », et qui ne résulterait d'aucun processus de construction, sortant du néant sans raison et sans cause. L'aléatoire existe cependant, mais il est l'expression d'un certain type de structure : il y a des processus aléatoires qui suivent des lois de probabilités diverses.

La neige qui tombe du ciel (sans vent) sur un plan bien dégagé suit une loi uniforme et produit, après la chute d'un grand nombre de flocons, une couche uniforme. Par contre, la neige qui tombe sur mon plancher par un trou du toit suit une loi gaussienne et produit à la longue un monticule de neige en forme de cloche. Chacune de ces lois est très simple, et pourtant le résultat d'ensemble est complexe.

Autre exemple : la boule de billard. Sa trajectoire « normale » est déterministe, mais si elle parvient en un point où elle est en équilibre instable sur une bosse du tapis, une infinité de directions futures deviennent possibles et on ne peut plus que donner une probabilité de trajectoire. Si les bosses du tapis sont très nombreuses, le système devient « chaotique ».

B. Retour sur la complexité...

Il y a une définition « mathématique » de la complexité, puisqu'on peut la mesurer d'après la quantité d'information nécessaire pour décrire un phénomène. Par exemple, une suite aléatoire de chiffres est « complexe » en ce sens qu'elle ne peut être résumée que par un algorithme aussi long qu'elle.

La découverte de toute régularité, de toute structure, quelle qu'elle soit, diminue la complexité car elle permet de réduire la longueur de l'algorithme. En ce sens, des suites qui ont pu être pensées comme aléatoires peuvent se révéler structurées, du moins partiellement. L'objectif scientifique reste toujours de réduire la complexité, donc d'accroître le déterminisme.

Le déterminisme est à la fois partiel (valable pour les micro-processus), et temporellement limité (à partir de configurations initiales connues), mais on ne peut pas juger de la « complexité » dans l'absolu car il n'y a pas de « complexité minimum » : la complexité est relative à la manière dont on représente une situation. Le mo-

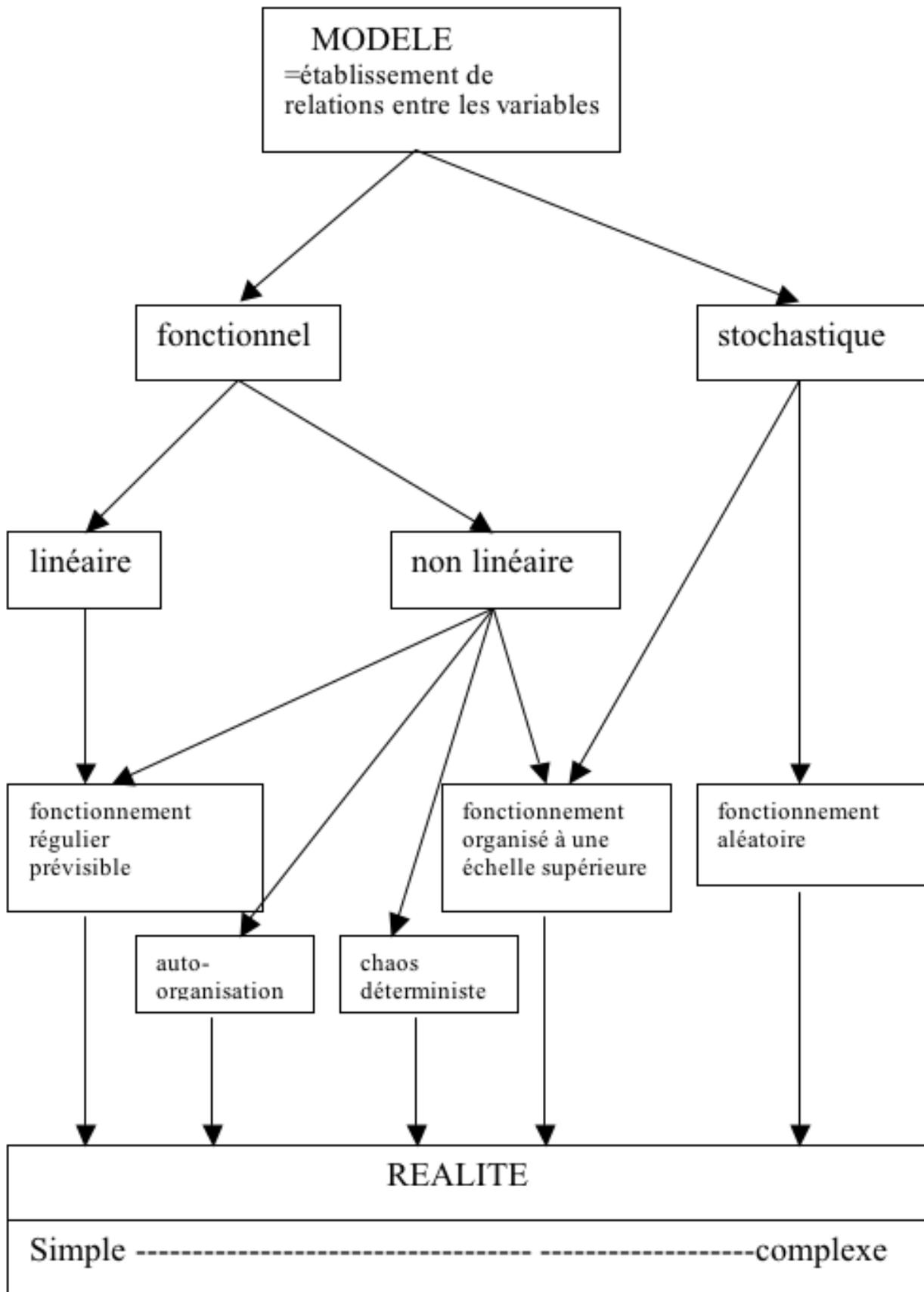
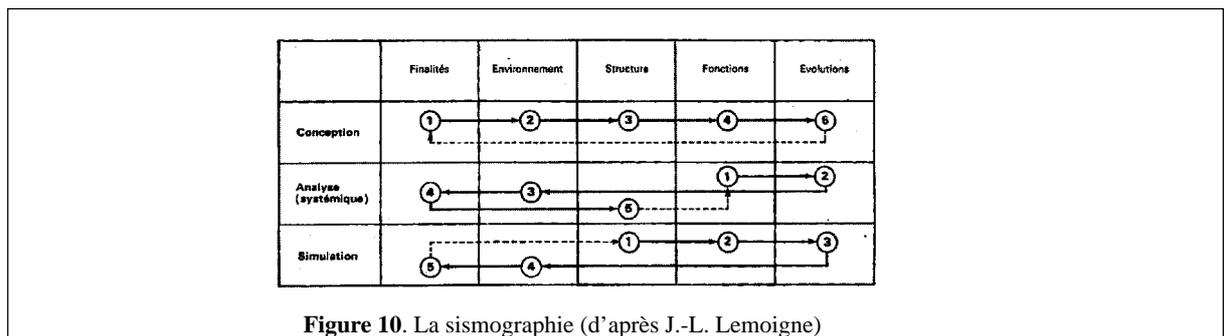
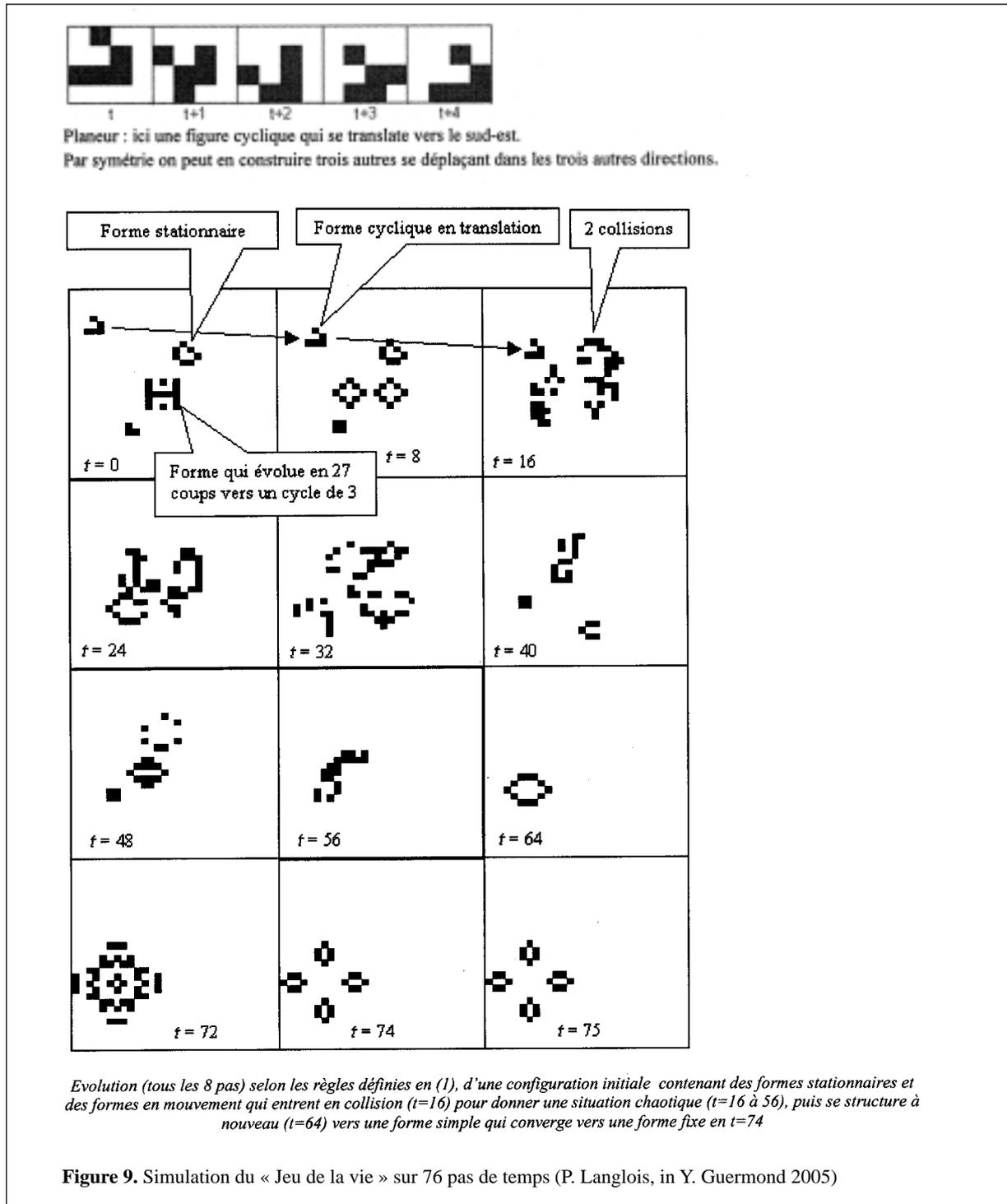


Figure 8. Tentative de réflexion sur les types de modélisation



dèle représente toujours la façon dont l'auteur, ou le groupe d'auteurs, se représentent un processus. Il répond donc à des objectifs et on ne peut pas en juger sur d'autres critères que sur la manière dont il rend compte de ce que l'on s'est proposé de décrire. Calculer la complexité réelle de la ville de Liège n'aurait pas de sens ; par contre, si on modélise la ville de Liège, on peut calculer la complexité de notre modèle, la comparer à celle d'autres modèles et vérifier celui qui s'approche le mieux (et le plus simplement...) du processus que l'on veut mettre en évidence.

C. L'émergence

La vraie question est celle de l'émergence de configurations spatiales nouvelles. A. Dauphiné définit justement la géographie comme *une science de l'émergence spatiale*. Comprendre une émergence ne signifie cependant pas la prédire : la prédiction n'est pas l'objet de la recherche scientifique puisqu'elle ne peut pas être validée par l'expérience.

Cette émergence de configurations spatiales inattendues peut être provoquée par des lois très simples. Le meilleur exemple qui peut en être donné est le « Jeu de la vie » de Conway. Les propositions de base en sont très simples.

- l'état **1** représente une cellule vivante, l'état **0** une cellule morte ;
- la transition $T(s, n)$ est fonction de l'état s de la cellule i et du nombre n de voisins vivants :
 - si trois de ses voisins sont à **1**, alors **0** devient **1** (elle naît),
 - sinon elle ne naît pas : **0** reste **0** (elle reste morte),
 - si 2 ou 3 de ses voisins sont à **1**, alors **1** devient **1** (elle reste vivante),
 - sinon **1** devient **0** (elle meurt).

Tous les automates ont ce type de transition, fonction de l'état précédent s et de l'effectif n de cellules voisines activées (à **1**). Si l'on examine le nombre d'automates de ce type, chaque fonction de transition possède $2 \times 9 = 18$ valeurs possibles du couple (s, n) .

À chacune on peut associer 2 résultats (**0** ou **1**), ce qui représente $2^{18} = 262\ 144$ fonctions de transitions possibles. Bien que le jeu de la vie soit totalement déterministe, ses configurations à long terme sont pratiquement impossibles à prévoir. On constate néanmoins des formes simples qui restent fixes lorsqu'elles apparaissent, comme un carré de 2 sur 2, ou d'autres qui réapparaissent selon un cycle très court, comme une ligne de 3 cellules qui oscille entre position verticale et horizontale. Mais ces formes ne sont pas définitivement stables. En effet, elles peuvent entrer en collision avec des formes mobiles (appelées planeurs) qui possèdent un cycle assez court de transformation tout en se décalant. Les collisions produisent d'autres formes qui complexifient le comportement global. La figure 9 montre le résultat

d'une simulation du « Jeu de la vie » sur 75 pas de temps.

On peut penser avec juste raison que l'interaction spatiale limite l'aléatoire en fonction des « contraintes spatiales » que sont les fortes pentes ou les zones humides, par exemple, mais l'interaction spatiale peut aussi bien augmenter la complexité à cause de l'interférence des cellules spatiales entre elles. Cette complexité ne peut être dominée que par une démarche patiente, tentant de faire progresser pas à pas les relations expliquées, ce qui conduit à des programmes de simulation virtuelle constamment améliorés pour tenter de restituer de plus en plus clairement les évolutions constatées dans le monde réel. C'est ce que nous pouvons appeler une « modélisation incrémentale », moins ambitieuse mais plus apte à cerner la complexité du réel que les grands modèles classiques aux hypothèses figées.

Jean-Louis Lemoigne définissait trois projets pour la « sismographie » (fig. 10). Pour une conception, on part des finalités pour aboutir à faire évoluer la structure dans son environnement par rapport à ces finalités ; pour une analyse, on part des fonctions pour les interpréter par rapport à quelques finalités afin d'en inférer la structure qui peut les assumer. Enfin, « s'il s'agit d'une simulation, nous partirions d'une structure, obtenue préalablement par conception ou par analyse, nous la ferions fonctionner et évoluer dans un environnement, et nous comparerions les résultats de cette activité simulée aux finalités envisageables ». C'est un programme de recherche permanent...

BIBLIOGRAPHIE

- BERQUE A., 2005. La médiance, *L'Espace Géographique*, n° 1.
- DAUPHINE A., 2003. Les théories de la complexité chez les géographes, *Anthropos*.
- DELAHAYE D., 2004. DUBOS-PAILLARD E., GUERMOND Y., LANGLOIS P., From modelling to experiment, *GeoJournal*.
- FORRESTER J.W., 1969. Urban Dynamics, *MIT Press* (Traduction française : Dynamique urbaine, *Economica*, 1979).
- GUERMOND Y. (dir.), 1984. *Analyse de Système en Géographie*, Presses Universitaires de Lyon.
- GUERMOND Y. (dir). *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*, Hermès, à paraître.
- LEMOIGNE J.-L., 1977. *La théorie du système général* (4^e édition), PUF.
- RIMBERT S., 1990. *Carto-graphies*, Hermès.

Adresse de l'auteur :

Yves GUERMOND

Rue du Docteur Roux, 15

F-76120 Grand-Quevilly - France

yves.guermond@wanadoo.fr