



HAL
open science

Systemes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle

Eric Daudé

► **To cite this version:**

Eric Daudé. Systemes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle. Modélisation en Géographie : déterminismes et complexités, chap. 13, Hermès, pp.353-380, 2005. halshs-01082644

HAL Id: halshs-01082644

<https://shs.hal.science/halshs-01082644v1>

Submitted on 18 Nov 2014

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.

Chapitre 13

Systemes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle

13.1. Introduction

Les régularités et les persistances qui s'expriment au-delà des contingences intéressent au premier plan tout modélisateur. Le géographe, et plus particulièrement celui qui pratique l'analyse spatiale, se reconnaît dans cette approche. Tenter de décrire ces régularités à partir de lois ou de modèles a été le ciment de ce courant de recherche : plus que la multiplicité des comportements individuels, ce sont les tendances générales qui s'expriment une fois supprimé le bruit de cette diversité qui intéresse le modélisateur. Ces modèles résumant et décrivent souvent assez bien les observations relevées à une échelle donnée. Ils s'avèrent cependant limités dans leurs capacités à expliciter les conditions d'apparition et les évolutions possibles de tels phénomènes. En s'appuyant sur les dynamiques locales, la complexité offre des concepts et des outils qui permettent de faire le lien avec les descriptions globales de l'analyse spatiale.

Penser la complexité implique entre autres choses d'appréhender les phénomènes observés à un niveau à partir des nombreuses interactions qui se produisent entre éléments opérant à un ou plusieurs niveaux inférieurs. Cette prise de position n'est pas récente, elle est formalisée par l'analyse systémique [BER 68] qui conçoit tout système comme une collection d'objets, des sous-systèmes, en interaction. Mais l'analyse systémique, tout au moins dans sa version instrumentalisée [FOR 80],

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

s'intéresse davantage aux modalités de fonctionnement d'un système et à son maintien qu'à ses conditions d'apparition et ses évolutions possibles. Les sciences de la complexité apparaissent ainsi en continuité logique avec la systémique, elles s'en distinguent par une approche fondée sur la sensibilité aux conditions initiales, la création, l'auto-organisation, l'irréversibilité et les processus de bifurcation ainsi que par les outils, principalement informatiques, qui accompagnent son développement.

L'intérêt d'une modélisation des processus qui se réalisent au niveau élémentaire d'une organisation pour reproduire les dynamiques de niveaux supérieurs est ici discuté au regard de l'analyse spatiale, qui privilégie dans ses approches méso et macro-géographiques, une description globale des dynamiques. Ce chapitre propose ensuite un exposé rapide de l'intelligence artificielle distribuée par le biais des systèmes multi-agents. Il est enfin proposé un tour d'horizon des champs d'application de ces technologies dans le concert des questionnements géographiques. Trois grandes classes de modèles peuvent être ainsi appréhendées pour rendre compte d'une *Géographie Artificielle*.

13.2. D'une description globale à une description locale des structures et des dynamiques spatiales

13.2.1. *Les pratiques en analyse spatiale*

Le géographe explore la manière dont les hommes produisent, par leurs comportements, l'espace géographique et étudie comment l'espace géographique ou physique, par ses règles, ses lois et ses attributs, anciens ou nouveaux, rétroagit sur ces comportements. L'apparition dans les années 1960 des approches quantitatives et théoriques en géographie révolutionne la discipline. Riche de ces nouvelles avancées, le géographe théorise, mesure, propose des modèles d'organisation de l'espace qui contribueront à enrichir et à transformer son savoir géographique.

Les apports de l'analyse spatiale sont nombreux, si l'on devait n'en citer qu'un ce serait celui de rendre explicite, réfutable, et donc scientifique le discours géographique. Les méthodes mathématiques et statistiques développées dans ce cadre d'analyse ont progressivement éloigné un ensemble de géographes de ce qu'était la géographie du XIXe siècle, une géographie de terrain, monographique, riche des particularismes et des états de faits. S'il existe bien une diversité de comportements à un niveau individuel¹, ce qui intéresse l'analyse spatiale ce sont les lois, les régularités qui s'expriment à un niveau global de description, une fois supprimé le bruit de cette diversité locale. Le géographe élabore ainsi des modèles d'interaction, de gravitation, de diffusion pour rendre compte des structures et

¹ Individu pris au sens statistique du terme.

dynamiques spatiales à meso ou macro échelle. Ces modèles font une large place à la distance (contiguïté, hiérarchie) et aux quantités (population, composantes socio-économiques) comme facteur explicatif du fonctionnement et de l'évolution des organisations spatiales, délaissant bien souvent l'explication des « déviations locales »² dans un discours approximatif, empruntant un peu à la sociologie, à l'économie ou à l'histoire³.

Tout modèle possède ses limites. En focalisant ses recherches sur la description de structures et de dynamiques globales, l'analyse spatiale a élaboré des grilles de lecture et d'analyse qui permettent de repérer et de décrire des phénomènes jusqu'alors peu visibles, mais ces modèles ne sont « lisibles » qu'à l'échelle où ils ont été élaborés. En laissant de côté les phénomènes sous-jacents et leurs interactions pour décrire un comportement global, on se prive de l'explication de tels comportements. Or on peut penser que ces structures et dynamiques macroscopiques sont le résultat de processus non visibles à cette échelle, mais fondamentaux pour l'évolution globale du système. On conçoit alors que l'ensemble des constituants du système concourent à sa dynamique globale, et que celui-ci se caractérise par des propriétés émergentes, qui apparaissent à un niveau macro alors qu'elles ne sont pas directement observables au niveau des constituants élémentaires du système. Si l'analyse spatiale permet de décrire ces phénomènes agrégés par des processus macroscopiques simples, l'un des enjeux de la *Géographie Artificielle* est de proposer une explication de ces phénomènes par une description locale des processus.

13.2.2. La pratique d'une géographie artificielle

Si les lois et les règles mises en évidence par l'analyse spatiale ainsi que les instruments employés sont sensibles aux échelles pratiquées, ce constat est également valable pour une géographie des représentations ou une géographie économique, qui travaillent à un niveau plus fin d'analyse, celui de l'individu, et qui mettent en avant l'importance des paramètres individuels pour rendre compte de l'organisation et de la structuration de l'espace⁴. Faire dialoguer ces géographies des « deux extrémités », la micro et la macro, est l'élément fondamental de l'émergence

² Les résidus du modèle de régression par exemple.

³ Cette attitude est largement pratiquée dans la communauté des sciences sociales. Réduire les phénomènes à un ou deux processus élémentaires contribue à « grossir » l'importance réelle de ces processus au détriment des autres, dont l'explication est au-dehors de la sphère disciplinaire : l'espace pour le sociologue, la psychologie pour l'économiste, etc.

⁴ Ces courants se distinguent évidemment dans leurs degrés de formalisation et par des jeux d'hypothèses plus ou moins forts, du comportement standardisé et rationnel de l'économie spatiale au « tous singuliers » de la géographie des représentations.

d'une *Géographie Artificielle*⁵. Comprendre pourquoi certaines régularités sont observées à un niveau global malgré l'absence de planification et de contrôle à ce niveau est une question qui relève de la *Géographie Artificielle*. Certaines configurations intra-urbaines ou les systèmes de villes sont des exemples de tels phénomènes : au-delà de leurs descriptions, il n'existe pas encore de modèles satisfaisant capables de montrer comment émerge un système de places centrales à partir des nombreuses actions d'agents interagissant. L'objectif est alors de découvrir comment ces régularités peuvent émerger à partir d'agents autonomes, en interaction et gouvernés par leurs perceptions de l'environnement et par leurs intérêts, qu'ils soient rationnels ou non. Quels sont les effets et les atouts de certaines configurations spatiales sur les individus et les sociétés ? Pourquoi certaines formes n'émergent-elles pas ? La *Géographie Artificielle* doit se positionner sur ces projets de recherche et ceux présentés dans les sections suivantes.

La *Géographie Artificielle* repose sur les principes des sciences de l'Artificiel [SIM 69] et de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) [GAS 89] qui met l'accent sur la résolution collective et distribuée de problèmes complexes et qui utilise très largement la simulation individu-centré pour simuler des phénomènes vivants, à l'instar de la Vie Artificielle [LAN 88], des Algorithmes Génétiques [HOL 92] ou des Automates Cellulaires [WOL 94]. L'appellation *Géographie Artificielle* s'impose alors comme un idiomatique, reconnue et lisible par la communauté des chercheurs en IAD dont le dénominateur commun est la complexité.

Les sciences de la complexité stimulent de nouvelles hypothèses de recherche pour l'étude de la production, de l'organisation et des transformations de l'espace géographique ainsi que des dynamiques qui s'y déploient. Avec la complexité il est tenté de montrer comment se réalise la transition entre une organisation (ou des objets d'un niveau donné) et les éléments qui constituent les « briques » de sa construction. On postule pour cela que des structures, des formes, des comportements globaux peuvent être le résultat d'un grand nombre d'interactions qui se réalisent entre éléments opérant à un ou plusieurs niveaux inférieurs. Dans ce contexte, tous les constituants concourent à la dynamique globale d'un système qui se caractérise par des propriétés émergentes, qui apparaissent à un niveau macro alors qu'elles ne sont pas directement observables au niveau des entités élémentaires du système. Un système complexe se caractérise ainsi par des créations, des inhibitions, des phases de fluctuations et par l'existence de dynamiques non-linéaires. De par la nature non linéaire de telles relations, le comportement

⁵ Cette appellation a émergé lors d'une discussion du groupe de recherche *Simulation et Territoire Artificiel*, J.-L. Bonnefoy, E. Daudé, P. Ellerkamp, M. Redjimi de l'U.M.R. 6012 ESPACE.

d'ensemble de ces systemes ne peut se reduire a la somme des comportements de ses composants. La *Géographie Artificielle* dispose ainsi d'une méthodologie pour formaliser des systemes ouverts et dynamiques.

Les systemes complexes sont souvent distribués, les processus à l'œuvre dans leurs fonctionnements sont répartis parmi les éléments du système. De tels systemes sont également ouverts sur leur environnement, capables de s'adapter à celui-ci et à ses évolutions. Ces systemes sont alors capables d'exhiber une certaine persistance dans le temps et dans l'espace malgré les nombreuses recompositions qui touchent les éléments qui les composent et les nombreuses entités qui les produisent. Une ville et son évolution dans le temps révèlent ainsi certaines régularités dans ses fonctions malgré les changements qui s'opèrent parmi ses composants : flux de population et d'entreprises, changements politiques, modification de la structure économique. Les structures internes des villes présentent également des régularités de forme malgré la présence de nombreux acteurs qui opèrent à l'intérieur de ces structures. Il s'agit donc de prendre en compte à la fois cette ouverture des systemes complexes sur leur environnement et leur nature distribuée dans une tentative de description et d'explication de leurs évolutions.

Les systemes complexes sont également dynamiques, capables d'atteindre et de maintenir une solution sous différentes conditions et malgré les nombreuses perturbations qui touchent leurs éléments constitutifs : les perturbations se propagent très peu dans les régimes organisés [WEI 89]. On s'éloigne ici de la théorie du chaos [MAN 04], pertinente dans l'univers de la physique lorsque des interactions non linéaires se produisent sur un petit nombre d'équations, mais où les métaphores tel « l'effet papillon » [LOR 79] sont certainement limitées dans leurs capacités à nous faire comprendre les systemes complexes en géographie humaine, plus robustes que chaotiques. La théorie de l'auto-organisation semble mieux convenir à l'interprétation de telles évolutions, caractérisées par des processus comme l'amplification et l'auto-apprentissage et fournit un cadre conceptuel, à travers l'auto-organisation critique [BAK 91 ; DAU 03], pour rendre compte des transitions de phases entre différents états du système. Il existe ainsi une grande régularité dans l'évolution du système de villes français, marqué par une forte hiérarchisation urbaine, malgré les nombreuses réaffectations et les évolutions différenciées des villes dans cette hiérarchie [GUE 93]. Il s'agit alors d'appréhender ce type de système, non plus seulement en recherchant une solution unique et repérée comme dans le modèle de Christaller [CHR 33], mais d'essayer de proposer des modèles capables, sous certaines conditions, de retrouver et de maintenir cette solution tout en acceptant les recompositions à l'intérieur de cette solution.

Les systemes complexes sont ainsi capables d'évoluer. Plus le nombre de niveaux est élevé et les interrelations nombreuses, plus le système sera complexe et susceptible de générer de la nouveauté. Accélération de l'histoire et évolution de la

complexité s'inscrivent ainsi dans un temps irréversible [PRI 1988]. Ainsi, à la suite du mouvement théorique et quantitatif, la géographie devient artificielle, utilisant à l'instar d'autres disciplines des technologies en avance par rapport à nos théories, notamment mathématiques [CIL 98], encore modestes dans leurs prises en compte de l'espace dans ces nombreuses dimensions, de la diversité locale, de la mémoire, des stratégies multiples et ne proposant pas de solutions analytiques pour expliquer des phénomènes macroscopiques à partir d'une formalisation de comportements individuels.

13.3. Les systèmes multi-agents

Parce qu'ils sont distribués et dynamiques, les systèmes multi-agents (SMA) sont particulièrement adaptés à une *Géographie Artificielle*. Les SMA mettent l'accent sur une modélisation fine des entités élémentaires d'un système, les agents, et sur les relations qu'ils entretiennent entre eux et l'environnement dans lequel ils se situent. Selon les types de modélisation multi-agents, l'environnement, l'agent et la communication peuvent être de nature différente. Quelques-unes de ces caractéristiques sont présentées dans les sections suivantes avant de préciser ce que pourrait être un système multi-agents géographique.

13.3.1. L'environnement

Dans la plupart des applications multi-agents, l'environnement fournit le contexte spatial des agents. L'environnement d'un SMA se caractérise essentiellement par cinq éléments qui permettent de définir l'espace de simulation.

C'est tout d'abord un *ensemble E de cellules ordonnées* notées $\{e_1, e_2, \dots, e_N\}$. L'ordre des cellules permet de situer une cellule e_i dans l'ensemble E et par rapport à une autre cellule e_j . L'ensemble E possède une *géométrie* qui décrit la forme des cellules et la structure géométrique du domaine. Si la plupart des plateformes SMA sont implémentées selon un domaine à mailles carrées ou hexagonales, des topologies vectorielles et réticulaires sont envisageables. L'environnement se caractérise également par une *métrique* qui permet de calculer la distance séparant une paire de points. Les principales mesures de distance utilisées sont la distance euclidienne et de Manhattan. Chaque cellule du domaine possède également un *vecteur d'information* (v) qui peut être composé d'éléments fixes ou variables. Dans une version minimale de l'environnement, ce vecteur représente les états possibles de la cellule, il est donc composé d'un élément variable $\{1 \text{ ou } 0 ; \text{ présence ou absence}\}$. Plus proches d'une réalité géographique, les cellules seront caractérisées par des éléments statiques (altitude, présence d'un fleuve, d'une route, etc.) et variables (occupation du sol, fertilité, etc.). Enfin

l'environnement se caractérise par des *lois* qui définissent l'univers des possibles dans la structure et l'évolution de l'ensemble E . Le choix entre un espace toroïdal ou fini dans un espace cellulaire à 2 dimensions constitue une loi qui structure le monde simulé. Les lois de l'environnement peuvent être globales, elles s'imposent alors à l'ensemble des cellules de E , et locales, elles sont dans ce cas spécifiques à une catégorie de cellules et sont prioritaires par rapport aux lois générales [CAN 98]. Pour illustrer cela, prenons un univers cellulaire composé de $n \times n$ cellules ayant chacune un vecteur d'information v du type :

$$v = \begin{bmatrix} \textit{altitude} \\ \textit{route} \\ \textit{fleuve} \\ \textit{type} \end{bmatrix} \text{ avec par exemple pour une cellule } i: v_i = \begin{bmatrix} 20.5 \\ 0 \\ 1 \\ \textit{libre} \end{bmatrix}$$

Les trois premiers éléments sont fixes et décrivent la configuration de la cellule à l'initialisation. L'élément *type* décrit l'état de la cellule à un instant donné (par exemple libre, industrie, commerce ou habitat). La loi générale de cet univers est que toute cellule de type libre peut évoluer vers l'un des trois autres états, et un seul. La règle locale est qu'une cellule qui prend la valeur un pour la composante fleuve ne peut pas changer d'état.

Un sixième élément peut être enfin rajouté pour caractériser l'environnement : les *règles de transition*. Ceci modifie alors la nature de l'environnement d'un SMA car il le rapproche de la conception d'un Automate Cellulaire (AC). Ceci implique, en effet, que l'environnement est capable d'évoluer indépendamment de l'action des agents qui y sont situés ; on se trouve ici dans une configuration où l'on couple un AC (chapitre 12 de P. Langlois) et un SMA. Ce type de couplage est intéressant, par exemple, pour étudier l'évolution de la valeur foncière à l'échelle intra-urbaine, celle-ci dépendant à la fois de l'usage et des usagés à un moment et à un lieu donné (les agents), et du type d'habitat et son évolution (la cellule). Ce couplage est particulièrement bien adapté pour explorer des systèmes où les relations du type dynamiques environnementales / dynamiques humaines sont fortes, comme la gestion des ressources naturelles [BOU 01].

L'environnement d'un SMA peut ainsi être un support, c'est-à-dire un simple espace d'évolution pour les agents [PAG 98] ; une ressource, l'environnement se caractérise par des attributs qui sont à l'origine de l'action des agents [BUR 96 ; EPS 96 ; BON 01] ; un champ de communication entre agents [DRO 94] ; une entité ayant sa propre dynamique [BOU 99 ; BOX 02]. L'environnement est ainsi un élément essentiel d'un SMA puisqu'il permet une formalisation explicite de l'espace.

13.3.2. Dans l'environnement...des agents

Dans l'environnement E existe un ensemble A d'agents, cet ensemble pouvant être fini ou infini. Ceci implique une séparation logique entre les éléments de l'ensemble E et ceux de l'ensemble A , $A \neq E$. Un agent A_i peut être décrit comme une entité autonome capable d'agir sur elle-même et sur tout ou partie des cellules e_i de l'environnement. Celui-ci peut communiquer avec les autres agents et se déplacer, mais pas nécessairement. L'agent est situé si sa position relative dans l'environnement est importante pour la dynamique du système, une ville par exemple, ou pas, seules ses actions sont alors prises en considération. Son comportement (figure 13.1) est la conséquence de ses compétences, de ses ressources, de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents [FER 95]. Cette définition et le conditionnel attaché aux différentes propositions recourent la distinction entre approche *réactive* et approche *cognitive* de l'agent.

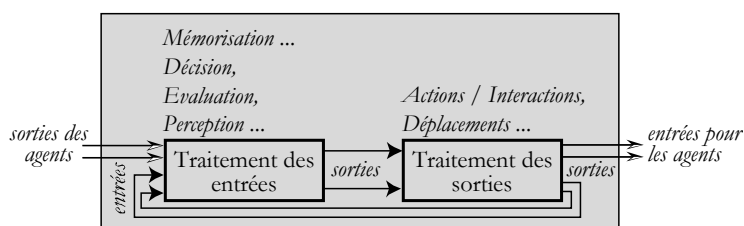


Figure 13.1 : Capacités d'un agent

Les systèmes d'agents réactifs sont en général composés d'un grand nombre d'agents au comportement simple, sans mémoire et ayant une représentation limitée de leur environnement. L'agent est conçu, dans son aspect le plus radical, comme une entité qui obéit à des stimuli externes pour mettre en œuvre une action, sans possibilité d'auto-contrôle, d'évaluation des résultats ni d'évolution comportementale [BRO 86]. A l'opposé, les systèmes d'agents cognitifs sont composés d'agents qui ont une mémoire et qui connaissent leur environnement et les autres agents. L'agent cognitif a des représentations et des connaissances (de soi, des autres, de l'environnement, etc.), il est capable de prendre des décisions en fonction de celles-ci, et est en mesure de tirer profit des expériences passées pour évaluer l'impact de son action dans le futur [VAR 89]. Les approches réactive et cognitive sont le fruit de courants de recherches ayant des préoccupations différentes, l'approche *cognitive* s'inspirant très largement des travaux des sociologues, notamment ceux issus du courant de l'individualisme méthodologique [BOU 92] ou de la psychosociologie [LEV 65], l'approche *réactive* s'inscrivant, elle, dans les

univers de l'éthologie [DEN 87], de la robotique [BRO 83] ou de la vie artificielle [REY 87 ; LAN 91 ; BED 00].

La distinction entre ces deux approches masque en fait une diversité de situations. Le type d'application pour lequel l'agent est conçu détermine en effet ses caractéristiques : capacité d'action (quelles sont ses compétences ?), capacité de communication (peut-il communiquer ? avec qui ? comment ?), capacité de mémorisation, capacité de perception (que perçoit l'agent dans son environnement ?), capacité d'adaptation (peut-il s'adapter aux nouvelles situations ou fonctionne-t-il selon des règles rigides ?), dimension de l'organisation (avec qui interagir ?), capacité de ses ressources, etc. [TRE 01]. Chacun de ses éléments renvoie à des recherches spécifiques : modèles de communications et d'interactions [KON 01], modèles de coordination [FAL 01], etc. De nombreux modèles et architectures d'agents sont également proposés, l'objectif étant de rendre opératoire, au sein de l'agent, l'ensemble de ces fonctions et les interactions entre celles-ci, faisant ainsi une large place aux mécanismes internes de l'agent [BOI 01].

13.3.3. *Les modes de communication entre agents*

La simple coexistence dans un environnement d'agents autonomes n'a *a priori* que peu d'intérêt en géographie si l'on admet que l'ensemble des objets manipulés ont pour dénominateur commun l'interaction. Ces interactions entre agents peuvent être motivées par les objectifs, les capacités et les ressources propres à chacun des agents. Les systèmes multi-agents sont ainsi implémentés pour favoriser les interactions entre agents ou au minimum entre les agents et leur environnement, et font appel à différents protocoles de communication.

Les interactions peuvent se réaliser de manière directe par l'envoi de messages entre agents ou indirecte par le biais de signaux *via* l'environnement. La plupart des modes de communication par passage de messages s'appuient sur la théorie des actes de langage, avec une syntaxe des signaux pour construire des actions [AUS 62] et des protocoles d'interaction relativement riches [SMI 80]. Ces modes de communication trouvent toutes leurs significations dans des domaines où les interactions entre agents sont nécessaires pour résoudre un problème global ou partager dynamiquement une charge de travail : contrôle du trafic aérien, commerce électronique, etc. Il s'agit, dans ces divers domaines d'applications, de coordonner par le biais de la communication les différentes actions des agents. Les modes d'interaction par signaux *via* l'environnement sont eux largement utilisés en éthologie avec par exemple le dépôt de phéromones par les fourmis [DEN 87], ces messages entraînant automatiquement une réaction chez un agent de type réactif. Ce mode de communication est par essence beaucoup moins riche que la transmission directe de message, un signal entraînant une action et une seule.

13.3.4. *Systèmes multi-agents et géographie*

Les différents éléments présentés dans la section précédente sont au cœur de toute réflexion sur un SMA géographique. En fonction des objectifs du modèle, on insistera davantage sur l'une ou l'autre de ces composantes : une géographie comportementale s'intéressera aux aspects cognitifs de l'agent, une géographie économique se préoccupera davantage aux types d'interactions et d'organisations. Un système multi-agents géographique est donc un ensemble plus ou moins organisé d'agents situés dans un environnement, lequel peut être doué d'une dynamique interne ou résultant de l'action des agents. Plusieurs niveaux d'organisation sont susceptibles de coexister dans un même système, les agents pouvant appartenir à un ou plusieurs de ces niveaux qui forment eux-mêmes des agents. Ces différents niveaux sont gouvernés par des règles qui leur sont propres, on parlera d'autonomie des agents, et sont en interaction permanente, on parlera d'organisation. Les interactions au sein de ces différents niveaux et entre les niveaux permettent au système de fonctionner et peuvent être à l'origine de phénomènes émergents. Appliqués à la géographie, les SMA offrent l'avantage par rapport aux automates cellulaires de définir des interactions spatiales plus complexes et également de définir des relations non explicitement spatiales, comme cela se produit dans le cas de réseaux commerciaux notamment [BUR 96] ou sociaux [DAU 02]. Ces modalités d'interaction peuvent se combiner au sein d'un même agent : proximité spatiale de type Moore et sociale de type sélectif étendu peuvent être sollicitées dans des modèles de diffusion [DAU 04a]. Il est également possible d'envisager la coexistence de différentes formes d'interactions dans un même modèle multi-agents ou un continuum dans les portées d'interactions des agents, celles-ci pouvant être associées à une différenciation des agents selon un attribut particulier : la portée spatiale des interactions varie avec l'attribut en question. Enfin les agents peuvent modifier les modes d'interaction au cours du temps, ce peut être le cas lorsque l'on souhaite modéliser la construction progressive d'un réseau social ou d'un système de villes.

La figure 13.2. illustre les différents points abordés dans cette section. L'environnement est l'espace de simulation, il se décline ici en différentes couches d'informations ce qui constitue une intégration possible des systèmes d'information géographique dans l'univers multi-agents [RAN 02]. Les aspects dynamiques de l'environnement peuvent être gérés sur la base d'un automate cellulaire, avec un ensemble de couches hiérarchisées : une couche de cellules par couche d'objets selon le nombre de niveaux choisis. Ces différentes couches disposent alors, en plus des règles d'association des cellules, de règles régissant les processus physiques de l'environnement par exemple. Sur cet environnement agissent les agents qui forment « l'intelligence » du système que l'on souhaite modéliser. Si la plupart des SMA spatialisés sont construits sur la base d'un seul niveau d'agents, cette représentation fait coexister n niveaux d'organisation

auxquels correspondent n classes d'agents, ici du niveau un au niveau trois. Les agents de niveau un sont par exemple des individus ou des entreprises, les agents de niveaux deux et trois représentent des agents économiques ou institutionnels (villes, collectivités territoriales). A chacun de ces niveaux peuvent s'établir des formes d'interactions, une mémoire du passé et des capacités d'actions distinctes desquels découlent, par le jeu des interactions, le fonctionnement du système. Il faut noter ici que l'approche n'est pas strictement ascendante, comme c'est le cas dans la plupart des applications des modèles d'auto-organisation. Il en découle une réflexion sur l'énoncé d'un projet à la fois « libéral et keynésien » dans le modèle, discussion amorcée dans le chapitre 7.

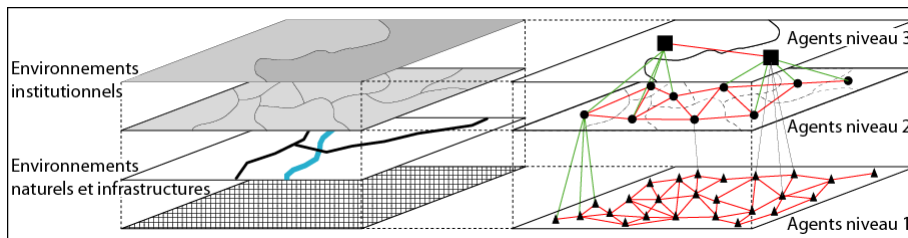


Figure 13.2. Représentation schématique d'un SMA en géographie

Les SMA offrent ainsi au géographe la possibilité d'associer dans ses modèles des paramètres quantitatifs et qualitatifs, de prendre en compte l'existence de plusieurs niveaux d'organisation et de dynamiques différenciées. Ces différents facteurs que l'on souhaite intégrer au modèle devront être collectés de manière exhaustive et hiérarchisée, comme pour toute approche orientée-objet. Ces modèles deviennent ainsi, grâce à la simulation informatique, des laboratoires artificiels. Les simulations individu-centrées permettent alors une vérification fine du comportement du modèle et des hypothèses qui y sont associées. Il est possible d'observer la dynamique du phénomène, de suivre le comportement des agents de manière individuelle, en groupe ou collectivement, d'analyser les résultats à l'aide de techniques statistiques évitant ainsi en partie l'inconvénient de la « boîte noire ».

13.3.5. Une typologie des modèles SMA

Si les SMA permettent de créer des modèles d'une grande variété, on peut imaginer une typologie des modèles de simulation selon leur état de performance : entre des modèles épurés – respectivement raffinés – dont les performances se situent dans leurs capacités à produire des résultats qualitativement –

respectivement quantitativement – proches des macro-structures observées. Lorsque l'on se situe dans une approche individu-centrée, cette typologie ne doit pas se limiter à des comparaisons en termes de macro-structures. Deux modèles peuvent en effet produire, à partir de comportements individuels différents, des résultats équivalents à un niveau macro. Il faudra donc distinguer les modèles de simulation capables de produire à la fois des résultats proches des macro-structures et des micro-comportements observés⁶. Selon ces différents éléments, on peut alors proposer une typologie des modèles de simulation telle que :

- type 1 : le modèle permet de reproduire des résultats qualitativement proches des macro-structures observées ;
- type 2 : le modèle permet de reproduire des résultats quantitativement proches des macro-structures observées ;
- type 3 : le modèle permet de reproduire des résultats quantitativement proches des macro-structures et qualitativement proches des micro-comportements observés⁷.

On ne considère pas ces différents types comme une échelle hiérarchique qu'il faudrait absolument gravir, le passage d'un type à un autre ne signifiant pas qu'un modèle est plus « au point » que les autres. Peut-être faut-il y voir davantage une différenciation en termes de projet : ce sont l'état d'avancement des connaissances dans le domaine considéré, les questions relatives à ce domaine, les objectifs de la modélisation et les données à disposition qui doivent déterminer *a priori* l'état pertinent où se situera le modèle, et non pas l'état à atteindre qui détermine les questions. L'ensemble de ces contraintes sera d'autant plus déterminant dans l'élaboration du modèle qu'il oriente le choix des entités élémentaires du système.

⁶ Nous n'avons pas considéré dans ce papier le point essentiel de la validation du modèle. Plus que la vérification du modèle de simulation qui consiste à s'assurer que le programme informatique est fiable et que le modèle est robuste, c'est-à-dire qu'il ne se comporte pas systématiquement de manière erratique pour d'infimes changements de valeurs, la validation consiste à définir dans quelle mesure les résultats des simulations sont en accord avec les mesures effectuées dans le réel. Différentes méthodes de validation sont possibles, soit à partir des données issues des simulations, on travaille alors par exemple sur des moyennes avec des intervalles de confiance, soit à partir des images de la simulation, on peut alors travailler sur les fréquences des différents états au cours de la simulation. La validation de ce type de modèles reste cependant un domaine peu exploré, une réflexion sur la conception de plans d'expériences comme en écologie est inévitable, voir [COQ 97].

⁷ La typologie issue du croisement de ces quatre indicateurs – Macro-structure ; Micro-comportement ; Quantitatif ; Qualitatif – pourrait être allongée. On se limite ici aux trois types les plus courants, la validation quantitative des comportements à un niveau micro étant souvent impossible compte tenu de l'indisponibilité générale de données à un niveau fin.

L'environnement, les agents et les interactions associés aux systèmes multi-agents offrent alors au géographe de nombreuses perspectives de recherche. Inspirée de la vie artificielle [EPS 96], la *Géographie Artificielle*, reliée à l'informatique, est un « laboratoire » qui permet la formalisation et la validation de processus locaux aptes, grâce à la simulation, à produire des dynamiques et des structures spatiales macro-géographiques.

13.4. Géographie Artificielle : simulations de structures et de dynamiques spatiales

Les développements théoriques des systèmes complexes et les technologies qui y sont associés connaissent un réel engouement dans la communauté des géographes depuis quelques années. Fondamentalement spatiaux, dans le sens où ils intègrent explicitement l'espace, ces formalismes intéressent la plupart des disciplines qui découvrent ou redécouvrent le rôle de l'espace dans les objets qu'elles étudient. Cette intégration de l'espace dans les recherches hors du champ de la géographie constitue une aubaine pour les géographes, ceux-ci pouvant alors partager avec d'autres disciplines les connaissances acquises de longue date sur les logiques et les règles spatiales, l'interdisciplinarité étant facilitée sur la base de méthodologies communes. Les géographes peuvent également tirer profit de ces nouvelles méthodologies, en reformulant leurs questionnements, en posant de nouvelles hypothèses, en explorant de nouveaux champs au cœur de leurs objets d'études et pour mettre à jour d'éventuelles carences dans leurs connaissances. Le seul choix des entités élémentaires dans l'élaboration d'un modèle nous persuade de l'étendue des efforts à réaliser pour avancer dans ce domaine.

En effet, si les recherches actuelles portent le plus souvent sur des modèles à deux niveaux, un niveau élémentaire où s'exercent les dynamiques et un niveau global d'observation, l'avenir nous conduit vers des modèles à plusieurs niveaux imbriqués. Or avec un seul niveau modélisé, on est parfois amené à rechercher des informations infra et supra à ce niveau, il en sera donc de même pour chacun des niveaux requis dans les modèles à venir. Ceci devrait nous pousser à réfléchir plus précisément sur la pertinence des entités choisies dans nos représentations des systèmes étudiés, sur les relations entretenues entre entités de même niveau et sur les relations inter-niveaux.

Les champs d'applications des SMA dans le concert des questionnements géographiques sont nombreux. Trois grandes classes de modèles peuvent être appréhendées pour rendre compte de cette *géographie artificielle* pour les années à venir. Ces domaines de recherche pourront paraître vastes, ils sont en fait très largement contraints par l'état de notre savoir géographique formalisable en termes d'agents, d'interactions et d'environnements. Les modèles présentés dans

les sections qui suivent sont consacrés à chacun de ces domaines et sont des formalisations abstraites, qui laissent de côté des aspects essentiels des thèmes abordés. Le parti pris ici est que la recherche de règles comportementales, de règles de transition et de types d'interaction abstraits est un bon outil de compréhension de la complexité du réel, laissant ainsi de côté des facteurs potentiellement pertinents et des circonstances particulières qui pourront s'ajouter à ces modèles de base.

13.4.1. *Emergence et évolution de structures spatiales*

Etudier la localisation et la distribution des objets dans l'espace est l'un des projets de la géographie. Le géographe construit pour cela des modèles dont l'objectif est d'éprouver les interprétations qu'il se donne des régularités observées à la surface de la terre, à l'instar des travaux précurseurs de von Thünen [VON 26] et de Christaller [CHR 33]. Von Thünen a proposé un modèle basé sur la rente foncière pour expliquer la genèse et le développement d'une organisation concentrique des cultures autour d'une aire de marché. A une autre échelle, Christaller développe un modèle basé sur le seuil de rentabilité et sur la portée limite des activités économiques pour rendre compte de la mise en place et de l'évolution hiérarchique d'un système de peuplement.

Les objets modélisés, que ce soient des individus, des entreprises ou des villes, possèdent des propriétés qui sont à l'origine de la formation et de l'évolution de structures spatiales. La réévaluation de ces propriétés et leur formalisation par des modèles sont au cœur de nombreuses recherches depuis ces travaux originaux. Parmi les différentes familles de modèles utilisés pour interpréter l'émergence et l'évolution d'objets spatiaux, la simulation multi-agents stimule de nouvelles questions et offre de nombreuses perspectives de recherche. Cette méthode permet de formaliser les connaissances au niveau élémentaire du système étudié, que ce soient des habitants, des quartiers ou une ville et permet, par la simulation, d'observer le comportement de ces hypothèses dans le temps et dans l'espace, faisant ainsi le lien entre des hypothèses posées à un niveau micro et des observations réalisées à un niveau macro.

La plupart des modèles géographiques qui rendent compte de la mise en place de structures spatiales posent des hypothèses sur les comportements individuels à l'origine de ces organisations. Ces hypothèses se fondent sur une branche de l'individualisme méthodologique, les individus ayant un comportement rationnel et maximisateur, la somme de ces comportements individuels amenant le système à un niveau d'organisation optimal [HOT 29 ; VON 26 ; WEB 09 ; LÖS 54 ; ALO 64 ; CHR 33]. Il apparaît intéressant, d'un point de vue heuristique, de reconsidérer l'ensemble de ces modèles par la

simulation multi-agents, où les individus ne seraient plus homogènes, disposant tous de la même information qui circule librement. Il est en effet possible de poser des hypothèses plus réalistes sur ces comportements humains, comme la circulation locale de l'information et des comportements non systématiquement maximisateurs. Ce type de recherche permettrait de s'interroger sur les différentes hypothèses, et leur formalisation, ainsi que sur les variables à prendre en compte au niveau élémentaire pour représenter de manière cohérente les observations relevées à un niveau meso-géographique comme cela a été fait dans le cadre du modèle de von Thünen [SAS 03] ou à un niveau macro-géographique, telles l'émergence et l'évolution d'un système de peuplement [BUR 96]. De nombreux modèles restent à réexplorer, tels ceux de Hotelling, d'Alonso ou de Weber, non pas pour réinventer le monde, mais pour se donner une base théorique forte et valider au-delà du discours des comportements susceptibles d'être producteurs d'espace.

Les SMA permettent, par exemple, d'élaborer des modèles de structuration de l'espace à partir de règles simples que l'on trouve dans la littérature géographique telle que l'écologie urbaine. Les modèles des « cercles concentriques » [PAR 25], la « théorie des secteurs » [HOY 33] ou encore des « centres multiples » [HAR 45], pour ne citer que les plus anciens, offrent une description, certes simplifiée et réductrice de la ville, mais dont les hypothèses prises en commun peuvent fournir, par la simulation, de nouvelles pistes de recherche. Encore à l'état de prototype, le modèle qui suit permet d'observer la structuration globale d'une ville à partir de règles locales d'implantations de trois types d'activités, soit l'habitat, le commerce et l'industrie et à partir d'un noyau initial de peuplement. L'espace de départ se caractérise par la présence d'un fleuve, d'une route et d'un espace urbanisable aux altitudes différenciées.

Chaque cellule e_i de E est caractérisée par un ensemble d'attributs à l'instar du vecteur d'information décrit précédemment. Cet environnement sert de support à la progression des agents, il peut être tour à tour une contrainte ou une opportunité pour la conversion des terres - des cellules - en une activité donnée. Trois agents sont responsables de l'urbanisation, soit un agent pour chacune des activités. Ces agents se déplacent aléatoirement dans l'espace et évaluent la pertinence d'un site donné à l'égard des règles d'implantation caractéristiques de leur fonction. Plus précisément, si les règles sont identiques pour les trois activités, les pondérations attachées aux différents facteurs vont influencer plus ou moins fortement l'implantation de l'une d'entre elles en un lieu, ici la cellule.

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

Six facteurs de localisation sont pris en compte : la proximité au fleuve (Vf) et à la route (Vr), la présence d'industrie (Vi), d'habitat (Vh) et de commerces (Vc) et l'attrait pour l'altitude (Va). Ces facteurs sont pondérés par des coefficients (α) qui peuvent être négatifs ou positifs⁸ selon l'importance attribuée par l'agent i à leur présence dans une contiguïté d'ordre un. La fonction suivante donne alors un indicateur (PA) qui varie de 0 à 100 et indique la « valeur » du site pour l'agent responsable de l'activité i :

$$PA_i = Vf * \alpha_i + Vr * \alpha_i + Vi * \alpha_i + Vh * \alpha_i + Vc * \alpha_i + Va * \alpha_i$$

Au plus la valeur PA attribuée par un agent pour un site sera proche de cent, au plus la probabilité pour qu'il installe son activité en ce site sera importante⁹. Pour la simulation présentée ci-dessous, les valeurs des coefficients traduites en symboles (Tableau 13.1) indiquent les préférences des trois agents du modèle. L'*agent-industrie* aura ainsi tendance à privilégier les sites proches du fleuve et d'un axe routier, la présence d'industrie dans l'environnement contribuant à augmenter l'attrait du lieu. Ce même lieu verra ses potentialités diminuer pour l'industrie s'il est proche d'habitations ou s'il se situe en altitude. La logique de ces préférences, qui sont en partie en concurrence avec celles des autres agents, contribue, au cours des simulations, au développement de l'industrie le long de l'axe routier et en direction du fleuve, son rejet pour l'altitude maintenant son extension le long de ce corridor.

Coefficients	<i>Fleuve</i>	<i>Route</i>	<i>Industrie</i>	<i>Habitat</i>	<i>Commerce</i>	<i>Altitude</i>
<i>Industrie</i>	+	++	++	-	-	--
<i>Habitat</i>	+	+	---	+	+	++
<i>Commerce</i>		+	-	++	+	-

Tableau 13.1. Poids des coefficients dans la simulation

⁸ La somme de ces coefficients vaut un.

⁹ Si la cellule n'est pas occupée et si $PA_i > a$ un nombre aléatoire tiré selon une loi uniforme de 0 à 100, alors la cellule prend l'état i . Par ailleurs si deux agents se situent à l'instant t sur une même cellule, la priorité est donnée à l'agent ayant le PA le plus élevé.

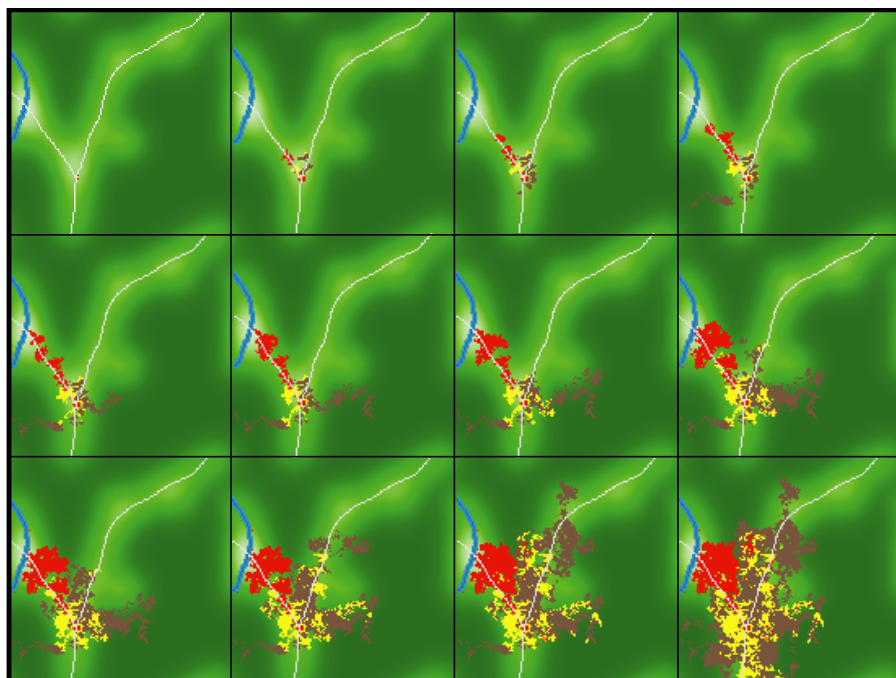


Figure 13.3. Environnement initial - espace urbanisable (en variation de vert selon l'altitude), route principale (gris) et fleuve (bleu) – et simulations : extension de l'habitat (marron), du commerce (jaune) et de l'industrie (rouge).

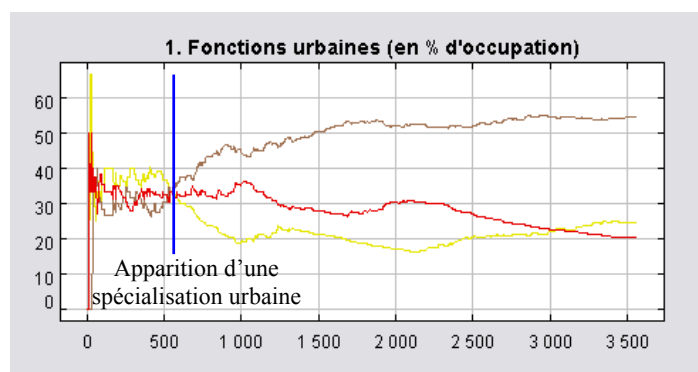


Figure 13.4. Taux d'urbanisation : habitat (marron), commerce (jaune), industrie (rouge).

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

L'*agent-habitat* est influencé par la présence dans son voisinage de cellules occupées par la fonction habitat, il recherche les sites en altitude et tend à rejeter tout lieu marqué par la présence d'industrie. Ceci se caractérise par un développement de zones résidentielles qui s'étendent vers l'est et le nord de la zone (marron), en altitude et à l'opposé des zones industrielles. Enfin l'*agent-commerce* est principalement influencé par la présence de sites résidentiels, ce qui favorise une imbrication de cette fonction au sein des zones d'habitat, mais également le long de l'axe routier et à proximité d'autres commerces (jaune).

Les stratégies d'implantation des trois *agents-urbanistes* conjuguées à la croissance urbaine produisent des effets de concurrence spatiale et provoquent des situations de blocage sur certains sites. Par exemple le taux d'occupation de l'industrie dans l'espace urbanisé décroît durant la simulation, alors qu'il n'y a pas dans le modèle une limitation de la densité globale de cette activité. Ce phénomène se produit car l'industrie est freinée dans son développement à la fois par les montagnes le long du corridor, le fleuve qui présente dans ce scénario un important effet de barrière et par l'espace déjà occupé par l'habitat.

Ce modèle, dont les premiers résultats sont présentés ici, permet de « reconstruire » une ville de manière décentralisée, ascendante et dynamique et tente de montrer que l'urbanisation et la structuration interne d'une ville sont le résultat de processus locaux basés sur le couple *attraction-répulsion*. L'objectif est, pour l'instant, de simuler différentes formes urbaines à partir de modèles qui ne prennent en compte que quelques variables parmi les nombreuses dimensions qui concourent à la production d'une ville. Cette approche implique de tester différentes hypothèses sur les stratégies de localisation, un paramétrage des coefficients pour étudier les diagrammes de phase, une étude des macrostructures produites et leurs évaluations à l'aide des connaissances issues de l'analyse spatiale. A partir d'une connaissance précise du comportement du modèle et de différents scénarii, on pourra ensuite introduire des conditions initiales observées (cartes d'occupation du sol par exemple), des catégories d'acteurs plus fines que celles utilisées ici ou encore une gestion globale minimale de la densité des activités dans l'espace.

13.4.2. Exploration de dynamiques dans l'espace

Si le géographe s'interroge sur les diverses dynamiques à l'origine des structures spatiales et de leurs changements, ses recherches portent également sur les dynamiques qui n'entraînent pas nécessairement une modification de l'espace sur lequel elles s'exercent. Ce peut être le cas par exemple de la diffusion des innovations ou d'une maladie, de la mobilité des personnes ou des biens.

Les trajectoires ou les déplacements sont en général modélisés sur la base de règles et de lois propres à l'échelle où ils sont observés : les flux de personnes entre les villes sont modélisés par un modèle gravitaire, on postule alors que la position relative des lieux et leurs poids déterminent fortement les dynamiques qui s'y déploient, ce qui est en partie validé par les résultats des modèles. Mais la relation ainsi établie entre des lois de l'espace et des objets qui le parcourent masque une réelle complexité, ce que révèle parfois l'importance des résidus. Au-delà des seules lois de la spatialité, d'autres lois peuvent être mobilisées pour expliquer et prédire les dynamiques globales dans l'espace géographique, ces différents facteurs explicatifs devant alors être introduits dans le modèle. On considère alors que les niveaux microscopiques sous-jacents au phénomène observé font émerger de telles régularités dans les dynamiques, celles-ci ayant en retour une incidence sur ces niveaux microscopiques. La diffusion constitue à ce titre une bonne illustration des apports des SMA par rapport aux approches classiques [DAU 04a].

Un exemple simple de diffusion, en adéquation avec le formalisme des SMA, est la propagation d'une épidémie. Dans ce modèle, le risque pour l'agent d'être infecté par le virus dépend de la proportion d'agents contaminés dans son voisinage spatial de type Moore, noté V . Ce risque dépend également de la virulence de l'épidémie, ses voisins infectés étant contagieux durant une période de temps limité. L'agent est ainsi l'unité de base où le modèle de diffusion est implémenté, il se caractérise par une fonction $\tau_i(t)$ qui régit la durée de vie T du virus une fois dans l'agent et un modèle de contamination $v_i(t)$ basé sur la proximité spatiale V . La transition de l'agent de l'état 0 (non infecté) à l'état 1 (infecté) est alors liée à la proportion d'agents virulents dans son voisinage spatio-temporel $V * T$, soit :

$$\langle v_i(t) \rangle_{V \times T} = \frac{1}{n_R} \sum_{j \in V(t)} v_j(t)$$

où n_R représente le nombre de voisins dans un rayon R , ici égal à une contiguïté d'ordre un.

La probabilité de transition à l'état 1 de l'agent i est alors donnée par la règle suivante :

$$P\left(\frac{s_i = 1}{s_i = 0}\right) = r \cdot \langle v_i(t) \rangle_{V \times T}$$

Ce modèle simple de diffusion donne des formes plus ou moins complexes, il autorise la non-saturation de l'environnement (figure 13.5), ici simple support de propagation, et permet d'observer différents comportements globaux selon la virulence et l'évolution des portées spatiales d'interactions [DAU 04b].

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

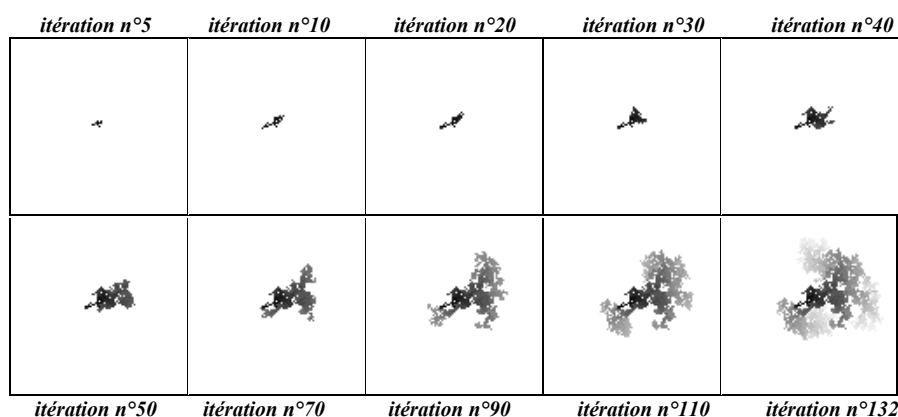


Figure 13.5. Illustration de la diffusion de l'épidémie, scénario avec T égal à 2 et un agent infecté au centre du domaine (101×101) à l'initialisation. Les différences d'intensité de gris représentent la date de l'infection, des plus anciens (foncé) aux plus récents (clair)

La parcimonie d'une telle modélisation offre l'avantage de proposer un contenu théorique intelligible et permet de découvrir les propriétés génériques du modèle à partir de configurations initiales aléatoires : à partir de quelle valeur de T y a-t-il percolation ? Quelle incidence la portée spatiale des interactions a-t-elle sur la temporalité de la diffusion ?, etc. Une fois éprouvé, ce type de modèle peut être enrichi par des configurations plus réalistes : inégale distribution des populations d'agents ; types de mobilité des agents [DAU 05] ; modalités d'interactions plus riches telle l'existence de réseaux de communication ; hétérogénéité des agents face au risque de contamination.

13.4.3. Pratiques, représentations et organisations de l'espace

De la pratique quotidienne de l'espace par les individus résulte un ensemble de représentations de cet espace. Ces représentations concernent aussi bien les objets qui se situent dans l'espace que l'espace lui-même, dans sa configuration, ses lois et ses règles. Ces pratiques et ces représentations relèvent de la sphère individuelle et sociale et participent à l'élaboration d'un espace de plus en plus organisé, l'individu producteur d'espace étant plus ou moins contraint par l'espace produit par le collectif. L'espace réel observé est ainsi le produit de nombreuses pratiques et représentations qui s'entrechoquent, se mélangent et sont parfois contradictoires. Ainsi, « acteurs individuels, groupes et institutions créent l'espace par leur travail, par leurs actes quotidiens, même ceux qui ne portent pas directement sur l'espace. Ils le font sur un terrain déjà défini, muni de « mémoires », qu'ils utilisent ou qu'ils transforment selon leurs moyens et leurs stratégies, lesquelles sont guidées en particulier par leurs représentations de l'espace lui-même. Par ses propres

structures, l'espace qu'ils produisent les amène à infléchir leurs actions ultérieures, selon ces représentations, également modifiées par les nouvelles pratiques de l'espace transformé » [BRU 92].

L'espace géographique est ainsi le résultat de processus dynamiques et distribués où les pratiques et les représentations jouent un rôle essentiel. Les individus, les groupes sociaux, l'Etat, représentent différents niveaux d'organisation de cet espace ayant isolément et collectivement une part dans la production de cet espace. Les pratiques et les représentations évoluent dans le temps, à des vitesses plus ou moins importantes selon les niveaux dans lesquels on se situe : l'individu a probablement une capacité plus rapide à modifier ses pratiques que n'en a un Etat. Malgré les modifications perpétuelles de ces schémas, la dynamique de l'espace géographique est rarement chaotique. Les systèmes multi-agents constituent alors un outil précieux pour explorer les liens dynamiques entre les sphères individuelles, sociales et spatiales. Des recherches théoriques [BON 01-03] utilisent les systèmes multi-agents pour explorer différents types de liens entre les individus, les groupes sociaux et les représentations spatiales. Ce type d'approche permet d'explorer un domaine, la sphère individuelle et les représentations, pour lesquels les connaissances et les recherches ne sont certainement pas aussi nombreuses qu'à une échelle meso ou macro-géographique.

A l'instar des domaines précédents de recherche en *Géographie Artificielle*, un modèle simple est présenté ici où les représentations individuelles contribuent à structurer un espace. Dans ce modèle de ségrégation de Thomas Schelling (1978), deux catégories d'agents sont présentes, disons les noirs et les gris. Ces agents sont préoccupés par la composition de leur voisinage, ils sont particulièrement attentifs à ce qu'une fraction minimale de leurs voisins soit de la même catégorie qu'eux. Si cette condition n'est pas remplie, ils se déplacent vers une cellule vide et la simulation se poursuit jusqu'à ce que l'ensemble des individus soit satisfait par sa situation. Ce qui est simulé ici c'est donc la manière dont les individus se représentent leur espace, ici un espace individuel de proximité, et les effets de ces représentations sur la configuration globale de l'espace. Ce qui est remarquable dans ce modèle c'est qu'avec une tolérance individuelle relativement forte, soit jusqu'à 66% d'individus différents dans l'entourage, les simulations amènent à une structure globale relativement ségrégée¹⁰. A contrario, avec une forte tendance au regroupement, c'est-à-dire un seuil à 88% de voisins similaires minimum, le modèle ne parvient pas à trouver une situation d'équilibre « géographique » global, les agents étant perpétuellement en déplacement dans l'espace de simulation. Ce phénomène est parfaitement compréhensible : avec un positionnement aléatoire des agents à l'initialisation, la probabilité de se trouver dans un site favorable est très faible pour un agent donné, il devra donc se déplacer à l'itération suivante. Comme

¹⁰ Dans un domaine de 51*51 cellules, avec 2500 agents divisés en 2 catégories.

tous les agents ont le même seuil de tolérance et le même comportement ils sont amenés, dans leur plus grande majorité, à se déplacer lors de cette itération et les suivantes, ce qui revient à recréer les conditions d'initialisation à chaque itération.

L'idée du modèle qui suit est de déterminer une règle simple qui permet aux individus de trouver un site qui leur convienne, et ceci de manière décentralisée. Lorsque les individus ont un seuil de tolérance relativement bas, c'est-à-dire une faible tolérance pour la différence, on peut soit favoriser le regroupement des individus selon leur catégorie avec une règle de type *gated communities*, qui exclut tout individu d'une catégorie dans le voisinage de l'autre catégorie, ou bien donner la possibilité aux préférences individuelles d'évoluer, en prenant en compte, par exemple, les représentations que les individus ont de leurs voisinages à travers le temps. Ainsi lorsqu'un individu est à proximité d'un ou de plusieurs agents satisfaits par leurs positions, c'est-à-dire qu'ils ne « souhaitent » pas se déplacer, et quel que soit leur type, l'individu abaisse son niveau d'exigence pour la similitude socio-spatiale. Avec cette hypothèse on suppose qu'un individu tire un certain bénéfice des choix et de la satisfaction de ses voisins et qu'il est donc influencé par son environnement socio-spatial. Plus l'individu croise, lors de ses déplacements, des individus satisfaits, plus son niveau d'exigence pour la similitude diminue. La figure 13.6 montre les résultats d'une simulation avec pour condition initiale un seuil de tolérance relativement faible pour l'ensemble de la population, soit 12% de voisins différents (similitude à 88%). On parvient cependant à une situation globale équilibrée car à la différence du modèle de T. Schelling sous les mêmes conditions, les individus sont progressivement influencés par leurs contacts et diminuent leurs « exigences » initiales, ce qui se traduit par une diminution des préférences moyennes pour la proximité socio-spatiale au sein de la population étudiée.

Ce modèle simplifié montre les potentialités des SMA dans la prise en compte de l'évolution dynamique des préférences individuelles et leurs effets sur la structuration de l'espace. Un vaste champ de recherche se profile dans le domaine de la composition sociale des villes et son évolution. L'inconscient collectif véhicule des représentations qui s'imposent à tout individu arrivant dans un lieu, avec ses quartiers riches, ses quartiers pauvres, ses quartiers branchés, etc. Ces représentations collectives ont parfois des temporalités relativement longues par rapport à la réalité urbaine. L'individu doit alors opérer un choix entre ses représentations globales, son expérience naissante de la ville et ses propres caractéristiques. Ces nombreuses dimensions produisent finalement un choix de localisation qui peut être différent des représentations globales. Les dynamiques d'évolution de la structure interne de la ville sont ainsi en partie le produit de choix individuels interagissant, les SMA contribuant alors à mieux comprendre les régularités observées au niveau de la ville malgré l'absence de planification ou de contrôle absolu à ce niveau.

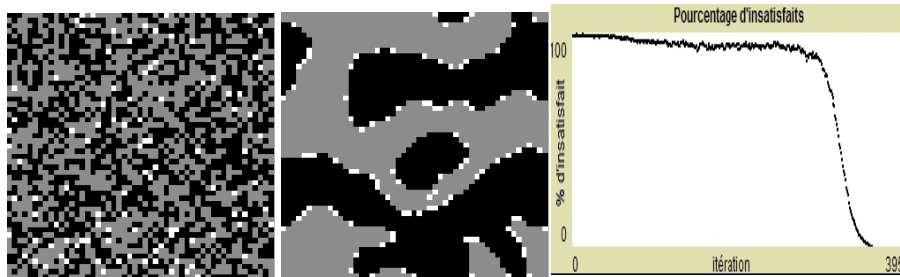


Figure 13.6. Représentations individuelles et structuration d'un espace

13.5. Conclusion

Si la simulation multi-agents offre de nombreuses perspectives pour les recherches géographiques, elle n'en demeure pas moins pour l'instant à l'état de prototype. La raison essentielle de ce constat est probablement que ces méthodes de simulation sont en avance par rapport à nos connaissances et nous obligent à reformuler et à repenser nos questionnements, long travail avant toute tentative de formalisation.

La plupart des travaux réalisés depuis les années 1990 relèvent soit de recherches théoriques, soit, lorsqu'ils sont appliqués à l'étude d'un cas concret, réalisés à une échelle micro ou meso-géographique. Le passage à la réalisation de modèles de simulation capables de reproduire des phénomènes qui s'exercent à une échelle plus petite et basés sur des entités de granularité fine implique la collaboration de nombreux chercheurs, issus parfois de domaines disciplinaires différents. Les modèles dynamiques ainsi créés exigent, outre leur validation opératoire, de nombreuses analyses de paramètres afin de calibrer le modèle aux observations réalisées sur le terrain ainsi que la collecte d'informations non disponibles sur le marché des données, corollaire à toute introduction de nouveaux outils. On trouvera ici un argument supplémentaire à ce type de technologie, apte à être mis en œuvre rapidement avec un minimum de connaissances informatiques pour des modèles de simulation théorique ou au contraire, capable de mobiliser toute une équipe de chercheurs sur des modèles dynamiques aux ambitions plus opérationnelles.

13.6. Bibliographie

[ALO 64] ALONSO W., *Location and Land Use*, Harvard University Press, Cambridge, 1964.

[ART 90] ARTHUR W. B., « Positive feedbacks in the economy », *Scientific American*, n° 2, p. 80-85, 1990.

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

- [ASC 00] ASCHAN C., MATHIAN H., SANDERS L., MÄKILÄ K., « A spatial microsimulation of population dynamics in Southern France: a model integrating individual decisions and spatial constraints », in G. Ballot, G. Weisbuch (dir.), *Applications of simulation to social science*, Hermès Paris, 2000.
- [AUS 62] AUSTIN J.L., *How to do things with words*, Clarendon Press, Oxford, 1962.
- [AXE 97] AXELROD R., « Advancing the art of simulation in the social sciences », in R. Conte, R. Hegselmann, P. Terna (ed.), *Simulating social phenomena*, Springer-Verlag, Berlin, p. 21-40, 1997.
- [AXT 94] AXTELL R., EPSTEIN J., « Agent-Based modeling : Understanding our creations », *Bulletin of the Santa Fe Institute*, vol. 9, n° 2, p. 28-32, 1994.
- [BAK 91] BAK P., CHEN K., « Self-organized criticality », *Scientific American*, p. 46-53, 1991.
- [BAR 00] BARRETEAU O., BOUSQUET F., « SHADOC: a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems », *Annals of Operations Research*, n° 94, p. 139-162, 2000.
- [BED 00] BEDAU M., *Artificial Life VII*, Proceedings of the seventh international conference on Artificial Life, Bradford Books, 2000.
- [BEN 98] BENENSON I., « Multi-Agent Simulation of residential dynamics in the City », *Comput. Envir. And Urban Systems*, 22, p. 25-42, 1998.
- [BER 82] BERLEKAMP E., CONWAY J., GUY R., « Winning way for your mathematical plays », vol. 2 : Games in particular, London : Academic Press, 1982.
- [BER 68] BERTALANFFY L. Von., *General systems theory*, Foundation, Development, Applications. New York : G. Braziller, 1968, trad. Française, *Théorie générale des systèmes*, Paris, Dunod, 1973.
- [BON 01] BONNEFOY J.-L., BOUSQUET F., ROUCHIER J., « Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents: pâture en forêt virtuelle », *L'Espace géographique*, n° 1, p. 13-25, 2001.
- [BON 03] BONNEFOY J.-L., « Des ménages aux structures urbaines : des représentations spatiales comme moteurs de dynamique dans des simulations multi-agents », *Cybergéo : Revue Européenne de Géographie*, n° 234, 2003.
- [BOU 92] BOUDON R. (dir.), *Traité de sociologie*, PUF, Paris, 1992.
- [BOU 99] BOUSQUET F., GAUTIER D., « Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : Les approches spatiales et acteurs », *Cybergeo*, <http://www.Cybergeo.press.fr>, 1999.
- [BOU 01] BOUSQUET F., LE PAGE C., « Systèmes multi-agents et écosystèmes », in J.P. Briot, Y. Demazeau (ed.), *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, Hermès Science Publications, Paris, 2001.
- [BRO 86] BROOKS R., « A robust layered control system for a mobile robot », *IEEE Journal of Robotics and Automaton*, RA-2 (1), p. 14-23, 1986.

- [BRU 92] BRUNET R., FERRAS R., THERY H., *Les mots de la géographie*, RECLUS – La documentation française, Paris, 1992.
- [BUR 96] BURA S., GUERIN-PACE F., MATHIAN H., PUMAIN D., SANDERS L., « Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system », *Geographical Analysis*, vol. 28, n° 2, 1996.
- [BOX 02] BOX P., « Spatial Units as Agents: Making the Landscape an Equal Player in Agent-Based Simulations », in H. Randy Gimblett (ed.), *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and ecological Processes*. Santa Fe Institute, Oxford University Press, p. 59-82.
- [CHR 33] CHRISTALLER W., *Die Zentralen Orte in Südeutschland*, Gustav Fisher, Jena, 1933.
- [CIL 98] CILLIERS P., *Complexity and Postmodernism : Understanding complex systems*, Routledge, London, 1998.
- [COQ 97] COQUILLARD P., HILL D., *Modélisation et simulation d'écosystèmes : Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Masson, Paris, 1997.
- [DAU 02] DAUDE E., *Modélisation de la diffusion d'innovations par la simulation multi-agents. L'exemple d'une innovation en milieu rural*, Thèse de doctorat en géographie, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 2002.
- [DAU 04a] DAUDE E., « Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion », *Cybergéo : Revue Européenne de Géographie*, n° 255, 2004.
- [DAU 04b] DAUDE E., LANGLOIS P., « Les formes de la diffusion », Colloque GéoPoint, Avignon, 2004.
- [DAU 05] DAUDE E., ELIOT E., « Effets des types de mobilités sur la diffusion des épidémies : l'exemple du Sida à Bombay », Colloque Théo Quant, Besançon, 2005.
- [DAU 03] DAUPHINE A., *Les théories de la complexité chez les géographes*, Anthropos, Paris, 2003.
- [DEL 94] DELAHAYE J.-P., *Information, complexité et hasard*, Editions Hermès, Paris, 1994.
- [DEN 87] DENEUBOURG J.-L., PASTEELS J., *From individual to collective behaviour*, Bâle, Birkhauser, 1987.
- [DRO 93] DROGOUL A., *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents*, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, spécialité Informatique, Paris, 1993.
- [DRO 94] DROGOUL A., FERBER J. (1994), « Multi-agent simulation as a tool for studying emergent processes in societies », in N. Gilbert, J. E. Doran (ed.), *Simulating societies : the computer simulation of social phenomena*. London, University of London College Press, p. 127-142.
- [EPS 96] EPSTEIN J. M., AXTELL R., *Growing Artificial Societies : Social science from the Bottom Up*, The MIT Press, London, 1996.

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

- [FER 95] FERBER J., *Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective*, InterEditions, 1995.
- [FOR 80] FORRESTER J., *Principles of system*, The MIT Press, London, 1980.
- [GAS 89] GASSER L., HUHN M., *Distributed Artificial Intelligence*, vol. 2, Morgan Kaufmann, San Mateo, 1989.
- [GIL 99] GILBERT N., TROITZSCH K., *Simulation for the social scientist*, Open University Press, Philadelphia, 1999.
- [GUE 93] GUERIN-PACE F., *Deux siècles de croissance urbaine*, Anthropos, Paris, 1993.
- [HAR 45] HARRIS C., ULLMAN E., « The nature of cities », *Annals of the American Academy of Political Science*, n°242, p. 7-17.
- [HEG 98] HEGSELMANN R., FLACHE A., « Understanding complex social dynamics : a plea for cellular automata based modelling », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 1, n° 3, 1998.
- [HEU 94] HEUDIN J.-C., *La vie artificielle*, Hermès, Paris, 1994.
- [HEU 98] HEUDIN J.-C., *L'évolution au bord du chaos*, Hermès, Paris, 1998.
- [HEL 85] HELPMAN E., KRUGMAN P., *Market structure and foreign trade*, MIT Press, Cambridge, 1985.
- [HOT 29] HOTELLING H., « Stability in competition », *Economic Journal*, n°39, p. 41-57.
- [HOL 92] HOLLAND J. H., *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, 2nd ed., MIT Press, 1992.
- [HOL 95] HOLLAND J. H., *Hidden order: How adaptation builds complexity*, Reading, MA, Addison-Wesley, 1995.
- [HOY 33] HOYT H., *One hundred years of land values in Chicago*, University of Chicago Press, Chicago, 1933.
- [KAU 95] KAUFFMAN S., *At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity*, Oxford University Press, Oxford, 1995.
- [KRU 97] KRUGMAN P., « How the economy organizes itself in space: a survey of the new economic geography », in W. B. Arthur, S. N. Durlauf, D. A. Lane (ed.), *The economy as an Evolving Complex System II. A proceedings volume in the Santa Fe studies in the sciences of complexity*, PERSEUS BOOKS, p. 239-262, 1997.
- [LAN 97] LANGLOIS A., PHIPPS M., *Automates cellulaires: application à la simulation urbaine*, Hermès, Paris, 1997.
- [LAN 88] LANGTON C.G., *Artificial Life*, Addison-Wesley, Boston, 1988.
- [LAN 91] LANGTON C.G., « Life at the Edge of Chaos », in C.G. Langton, C. Taylor, J.D. Farmer, S. Rasmussen (ed.) *Artificial Life II*. Boston, SFI Studies in the Sciences of complexity, vol. X, Addison-Wesley, p. 41-91, 1991.

- [LEV 65] LEVY A., *Psychologie sociale, textes fondamentaux*, Dunod Paris, 1965.
- [LOR 79] LORENTZ E., « Predictability : Does the flap of a butterfly's wings in Brazil, set up a tornado in Texas ? », American Association for the Advancement of Science, Washington, 1979.
- [LÖS 54] LÖSCH A., *The economics of location*, Yale University Press, 1954.
- [MAN 04] MANDELBROT B., *Fractals and Chaos: The Mandelbrot set and beyond*, Springer, New-York, 2004.
- [PAG 98] PAGE S. E., « On the emergence of cities », Santa Fe Institute, Working Paper 98-08-075, 1998.
- [PAR 25] PARK R., BURGESS E., MCKENZY R., *The City*, University of Chicago Press, Chicago, 1925.
- [PRI 79] PRIGOGINE I., STENGERS I., *La nouvelle alliance, Métamorphose de la science*, Gallimard, Paris, 1979.
- [PRI 88] PRIGOGINE I., STENGERS I., *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, Paris, 1988.
- [PUM 97] PUMAIN D., « Pour une théorie évolutive des villes », *L'espace Géographique*, n° 4, p. 119-134, 1997.
- [RAN 02] RANDY H., *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and ecological Processes*, Santa Fe Institute, Oxford University Press, 2002.
- [RES 94] RESNICK M., « Beyond the Centralized Mindset », *Journal of the Learning Sciences*, vol.5, n° 1, p. 1-22, 1994.
- [REY 87] REYNOLDS C., « Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model », *Proceeding of SIGGRAPH'87*, 1987.
- [SAN 92] SANDERS L., *Système de villes et synergie*, Anthropos, Paris, 1992.
- [SAS 03] SASAKI Y., BOX P., « Agent-based verification of von Thünen's location theory », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, n° 2, 2003.
- [SCH 78] SCHELLING T., *Micromotives and macrobehavior*, Norton, New York, 1978.
- [SIM 69] SIMON H., *Les sciences de l'artificiel*, Folio essais, Paris, 2004, (1^{er} Ed. 1969).
- [TES 02] TSEFATSION L. (2002b), « Agent-Based Computational Economics : Growing Economies from the Bottom Up », *Artificial Life*, vol. 8, n° 1, p. 55-82, 2002.
- [TRE 01] TREUIL J.- P., MULLON C., PERRIER E., PIRON M., « Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées », in L. Sanders (dir.), *Modèles en analyse spatiale*, Hermès, Paris, p. 219-252, 2001.
- [VON 26] VON THÜNEN J. H., *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie*, (1826), Edition complète par Scumacher-Zarchlin H. (1875), Hempel und Parey, Wiegandt.

Modélisations en géographie : déterminisme et complexités

[VAN 00] VANBERGUE D., « Modélisation de phénomènes urbains: Simulation des migrations intra-urbaines », in Pesty S., Sayettat-Fau C. (dir.), *Systèmes multi-agents, JFIADSMA'00 : méthodologie, technologie et expériences*, Hermès, Paris.

[VAR 89] VARELA F., *Connaître. Les Sciences cognitives, tendances et perspectives*, Seuil, Paris, 1989.

[WEB 09] WEBER A., *Über den Standort der Industrien*, Tübingen (1909), Trad. Anglaise: *Alfred Weber's Theory of the location of Industries*, University of Chicago Press, Chicago, 1929.

[WEI 89] WEISBUCH G., *Dynamique des systèmes complexes : Une introduction aux réseaux d'automates*, InterEditions CNRS, Paris, 1989.

[WOL 84] WOLFRAM S., « Universality and complexity in cellular automata », *Physica D.* 10, p. 1-35, 1984.

[WOL 94] WOLFRAM S., *Cellular automata and complexity*, Reading, MA, Addison-Wesley