



HAL
open science

**Simulations et modèles d'analyse spatiale :
compte-rendu de l'École Thématique de Montpellier
(17-21 octobre 2001)**

Frédérique Bertoncello, Laure Nuninger

► **To cite this version:**

Frédérique Bertoncello, Laure Nuninger. Simulations et modèles d'analyse spatiale : compte-rendu de l'École Thématique de Montpellier (17-21 octobre 2001). Bulletin de liaison de l'Association d'étude du monde rural gallo-romain, 2001, 11, pp.39-46. halshs-00853880

HAL Id: halshs-00853880

<https://shs.hal.science/halshs-00853880v1>

Submitted on 13 Jun 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

Simulations et modèles d'analyse spatiale

Compte rendu de l'école thématique de Montpellier, 17-21 octobre 2001

Frédérique BERTONCELLO* et Laure NUNINGER**

* Chargée de recherche, UMR 154, Lattes.

** Doctorante, ATER, UMR

6565, Chrono-écologie, université de Franche-Comté.

Du 17 au 21 septembre 2001 s'est tenue à l'université Paul Valéry de Montpellier une école thématique sur les « Simulations et modèles d'analyse spatiale ». Organisée par le GDR 1559 du CNRS Libergeo, cette école proposait de faire le point sur les innovations réalisées en matière de modélisation explicative et prédictive en géographie. Il s'agissait de mettre à disposition d'une communauté scientifique pluridisciplinaire des modèles spatiaux relativement aboutis tant par la fiabilité de leur prévision que par leur accessibilité méthodologique, l'objectif étant de favoriser les réflexions et échanges interdisciplinaires autour des outils de modélisation. Plus de 80 participants étaient présents, majoritairement des géographes, mais aussi des économistes, urbanistes, statisticiens, environnementalistes (agronomes, hydrologues et botanistes) et quelques archéologues. Devant l'intérêt que présentent les outils de modélisation pour la recherche en archéologie spatiale, il nous a paru intéressant de faire un bref compte rendu des modèles présentés au cours de l'école ainsi que des questions méthodologiques et conceptuelles soulevées par l'utilisation de ces outils d'analyse.

De l'utilisation des modèles...

Selon la définition proposée par François Durand-Dastès (UMR 5504 Géographie-Cités, Paris) lors de cette école, un modèle est une « représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre ». Les modèles géographiques sont utilisés pour analyser et expliquer l'organisation spatiale d'un phénomène à la période actuelle ou récente. À cet objectif analytique s'ajoute l'intérêt des modèles en tant qu'outils de simulation. En essayant de prévoir comment sera structuré l'avenir, la modélisation se met ainsi au service de l'aménagement du territoire, de la gestion des ressources et du développement durable. En archéologie spatiale, nous avons une vision finalement similaire mais symétrique d'un point de vue chronologique, dans la mesure où nous nous attachons à décrire et comprendre l'organisation spatiale d'un phénomène ou d'une société passés. Il s'agit également de comprendre les processus qui ont généré cette organisation et l'ont amenée à se transformer. Deux approches sont alors envisageables :

– Une approche de type séquentiel qui consiste à comparer les situations observées à différentes époques afin d'en tirer des conclusions sur l'évolution de l'organisation spatiale dans la longue durée et sur les causes possibles de ces transformations.

– Une seconde approche, plus dynamique, dont l'objectif serait de percevoir et de comprendre quelle est la part des héritages et des innovations dans les structures observées, en effectuant une sorte d'analyse régressive des processus spatiaux.

Que ce soit d'un point de vue séquentiel ou dynamique, les outils des géographes semblent à même d'ouvrir des perspectives intéressantes pour répondre aux problématiques de l'archéologie spatiale. S'inscrivant dans une démarche exploratoire, la modélisation permet de tester différentes hypothèses d'explication, des scénarios variés, afin d'évacuer ce qui est de l'ordre du « banal » dans les phénomènes observés (Durand-Dastès, Sanders 1985 : 6-7), pour faire apparaître les spécificités d'une région ou d'une période.

Modèles élémentaires et modèles complexes

Les modèles présentés au cours de l'école thématique ont été répartis en deux ensembles présentés par Lena Sanders (UMR 5504 Géographie-Cités, Paris) : les modèles élémentaires – mais pas simples pour autant ! –, basés sur un type de référence théorique (la Loi de Reilly pour le modèle gravitaire par exemple), et les modèles complexes, qui combinent plusieurs modèles élémentaires. Ont également été présentés certains outils d'analyse ou de représentation, qui ne constitue pas à proprement parler des modèles mais interviennent en amont ou en aval de la modélisation (analyse d'image, représentation de données spatio-temporelles). C'est donc ce découpage que nous adopterons pour notre inventaire des différents modèles présentés pendant l'école thématique, en insistant sur l'intérêt que nous y avons perçu pour les problématiques archéologiques.

Modèles élémentaires

• *Accessibilité/distance*

– Les modèles d'accessibilité et de distance sont essentiellement utilisés en géographie pour traiter des questions relatives aux systèmes de transport (simulation de modification de l'offre de transport, évaluation des infrastructures : modèle Nod présenté par Alain Lhostis (UR Inrets-Trace, Lille) et Laurent Chapelon (UMR 6012 Espace, Montpellier)). Ils présentent l'intérêt d'intégrer dans l'évaluation des réseaux de communication, des unités de mesure de la distance en coût de transport (optimisation des itinéraires en termes de temps de parcours, de kilométrage, de dénivelé, etc.), ainsi que des mesures rendant compte de la morphologie du réseau (mesure de la sinuosité, de la pente des voies). On voit l'intérêt que cela peut présenter en archéologie, les considérations de temps de parcours, de dénivelé, voire de sinuosité des itinéraires étant sans doute plus pertinentes à prendre en compte pour une modélisation des réseaux d'habitats (réseaux de communications et réseaux hiérarchiques) que la seule distance euclidienne (à vol d'oiseau).

– Les anamorphoses permettent de représenter graphiquement l'espace en fonction de ces différentes unités de distance : les échelles spatiales sont déformées pour rendre compte non plus des distances euclidiennes, mais des distances en temps de parcours par exemple. Ce type de cartographie offre une visualisation très suggestive de l'espace en fonction des paramètres choisis.

– En autorisant la comparaison des formes prises par un espace selon les paramètres de représentation spatiale retenus, le modèle de la Régression bidimensionnelle (Waldo Tobler, université de Santa-Barbara, États-Unis, et Colette Cauvin, UMR 7011 Images et Ville, Strasbourg) permet de révéler les modifications de structure, d'organisation de cet espace.

• *Attractivité*

Le modèle CalCom, développé par Cécile Tannier (UMR 7011 Images et Ville, Strasbourg), est un outil d'aide à la décision permettant de calculer l'attractivité des agrégats

commerciaux (ou zones commerciales) d'une ville pour différents types de commerces à la recherche d'un lieu d'implantation. L'attractivité est mesurée en fonction de différents attributs (nombre de places de parking, nature de la clientèle, etc.), en tenant compte d'une part des différentes perceptions possibles des attributs selon le type de commerce considéré ; d'autre part de l'importance allouée à chaque attribut par chaque type de commerce dans le choix d'un lieu d'implantation. Ces différentes mesures sont ensuite combinées pour calculer un indice qui rend compte de la valeur d'attractivité de chaque zone commerciale pour chaque type de commerce.

On envisage aisément les applications archéologiques de ce modèle, pour évaluer par exemple le potentiel d'attractivité d'un site (au sens géographique du terme) pour l'implantation d'établissements, en fonction à la fois des caractéristiques de l'espace (critères topographiques, pédologiques, insertion dans les réseaux de communication et d'habitat, etc.) et des types d'établissements considérés. Tout l'intérêt réside dans la possibilité de tester différents scénarios en faisant varier la valeur d'attractivité de chaque paramètre (en donnant par exemple un poids plus important aux qualités agrologiques du sol qu'à la proximité d'une agglomération). Il faut noter que ce modèle a fait l'objet d'un développement informatique, facilement adaptable à d'autres problématiques.

Soulignons également l'utilisation, dans ce modèle, de « variables floues » pour évaluer la perception de chaque attribut par chaque type d'établissement. Ces variables se présentent sous forme de fourchettes de valeurs aux bornes élastiques, c'est-à-dire avec un degré d'incertitude qui correspond aux nuances exprimées dans le choix d'un niveau de satisfaction par un établissement. Elles sont particulièrement adaptées pour rendre compte de données subjectives liées à la perception ou au comportement des individus. Elles apparaissent donc tout à fait intéressantes pour l'archéologue qui manipule quotidiennement ce type de données (par exemple la perception que l'on prête aux anciens concernant la qualité d'un lieu pour l'installation d'un habitat, en fonction de son ensoleillement, de la proximité des ressources en eau, etc.). On peut toutefois regretter de n'avoir pas eu plus d'informations sur la construction et la mise en œuvre de telles variables pendant l'école thématique.

• *Visibilité*

Le modèle 3D-Ima, conçu par Kamal Serrhini (EA 2111 SVT-CESA, Tours), permet de simuler l'impact visuel d'un projet d'aménagement ponctuel ou linéaire (en l'occurrence une autoroute) sur le paysage. Il introduit un certain nombre de paramètres (hauteur de l'ouvrage, spectateur immobile ou en mouvement), covisibilité (détermination des zones de l'espace visibles depuis chaque point de l'aménagement et détermination des parties de l'aménagement visibles depuis chaque point de l'espace alentour), visibilité orientée ou non, etc. Ces paramètres permettent une perception fine de l'impact visuel d'un ouvrage sur le paysage. En archéologie, ce modèle pourrait s'appliquer aux monuments publics ou funéraires, aux fortifications, etc., afin d'appréhender leur pouvoir d'ostentation dans un territoire. Il serait ensuite possible de proposer plusieurs scénarios en fonction des hypothèses d'élévation associées au monument étudié.

• *Interactions spatiales*

Le programme Reilly, développé par Claude Grasland (UMR 5504 Géographie-Cités, Paris), est un logiciel d'analyse spatiale à vocation didactique, qui permet de calculer et de représenter graphiquement les aires d'attraction théoriques des centres urbains à l'aide de la loi de Reilly et de ses variantes, le modèle de Huff notamment (Pumain, Saint-Julien 2001 : 19-43). Le modèle de Reilly repose sur trois hypothèses fondamentales :

- l'importance des échanges entre deux lieux est fonction du poids de chaque lieu ;
- cette importance est inversement proportionnelle à la distance qui sépare ces deux lieux ;
- les interactions sont plus fortes entre deux lieux appartenant au même ensemble territorial.

Ce modèle permet de déterminer la hiérarchie des centres urbains, leurs liens de dépendance théoriques et leur aire d'attraction. Le logiciel développé par C. Grasland a l'avantage d'intégrer une série de paramètres permettant d'affiner le modèle gravitaire, en jouant sur l'importance de la distance dans les interactions spatiales (la distance peut être plus ou moins contraignante : variations du « frein de la distance »), ou en relativisant les différences de masse (c'est-à-dire d'attractivité) entre les centres par l'intégration de seuils d'attraction minimale devant être dépassés pour qu'un centre exerce sa domination sur un autre. Il est ainsi possible de tester différents modèles hiérarchiques selon les valeurs données à la distance et à la masse des centres. Un autre intérêt du logiciel est de calculer l'attractivité relative des centres les uns par rapport aux autres : contrairement à la loi de Reilly, le modèle de Huff permet de tenir compte de l'existence de zones de transition floues entre les aires d'influence des centres. Dans ces zones, l'attraction exercée par un centre plutôt qu'un autre dépend de la force d'attraction de chaque centre par rapport à l'influence de l'ensemble des centres. Il est ainsi possible de définir et de cartographier, en tout point de l'espace, le potentiel d'attraction exercé par chaque centre, ce qui permet de repérer les aires de domination principale d'un centre et les aires d'attraction multiple, subissant l'attraction simultanée de plusieurs centres.

Des applications archéologiques du modèle gravitaire ont déjà été réalisées et ont montré tout leur intérêt pour appréhender la structure et l'évolution des réseaux d'habitats du I^{er} siècle avant notre ère au XI^e siècle en Vauvage et Lunellois (Durand-Dastès et al. 1998 : 203-229). De manière générale, un des problèmes qui se pose lors de l'application de ce modèle à une réalité archéologique est celui de la mesure de la distance adoptée. En effet, l'utilisation de la distance euclidienne (à vol d'oiseau) dans le modèle de Reilly, implique une isotropie de l'espace, qui ne correspond évidemment pas à la réalité. Il nous semble donc nécessaire de développer ces modèles en essayant de prendre en compte la variabilité des propriétés de l'espace, à commencer par la topographie. En effet, les interactions entre les établissements ne se développent vraisemblablement pas avec la même intensité selon qu'ils se trouvent dans la même vallée ou qu'ils sont séparés par une ligne de crête. L'utilisation de distance-coût (en temps de parcours) ou l'introduction d'un facteur d'allongement des distances en fonction du dénivelé, devrait permettre de réintégrer le relief dans la modélisation des réseaux d'habitats.

• *Auto-corrélation spatiale*

Les mesures d'auto-corrélation spatiale et les applications associées, présentées par Didier Josselin et Arnaud Banos (UMR 6049 THEMA, Besançon), permettent de déterminer comment des objets spatiaux (des bâtiments, des parcelles agricoles, des sites archéologiques, etc.) sont organisés les uns par rapport aux autres dans l'espace, au niveau local ou global. Il s'agit de mesurer le degré de ressemblance entre deux lieux en fonction de leur proximité (Pumain, Saint-Julien 1997 : 133-139). En analysant la structure et le voisinage des objets dans un espace, il est possible de mesurer les contrastes existants dans leur organisation, d'évaluer la présence d'une structure spatiale particulière dans un phénomène étudié (la mise en valeur agricole d'un territoire communal par exemple), d'identifier des discontinuités spatiales, etc. Les valeurs obtenues permettent d'évaluer dans quelle mesure la présence d'un objet de tel type accroît ou réduit la probabilité qu'un objet de même type ou de type différent existe à proximité.

Des applications archéologiques de l'auto-corrélation spatiale peuvent être envisagées pour étudier la structure d'un réseau d'habitats. Il s'agirait par exemple d'évaluer, au niveau local (au niveau du site archéologique) ou global (au niveau du réseau d'établissements), la probabilité que la présence de tel type d'établissement ou de telle forme spatiale de réseau appelle ou repousse l'existence à proximité d'un type ou d'une forme similaire.

- ***Évolution des structures spatiales et interactions***

Dans la perception du changement, Denise Pumain (UMR 5504 Géographie-Cités, Paris) introduit les idées d'un changement banal et d'un changement structurel. Le premier correspond aux principes de diffusion : hiérarchique, par proximité, par transformation distribuée ou par fluctuation. Le second changement s'appuie sur l'amplification ou l'accumulation de certains phénomènes qui induisent des transformations plus rapides et plus brutales, que l'on peut assimiler à des bifurcations. Enfin, une autre évolution correspond au changement des propriétés de l'espace géographique, comme celle du réseau de communication par exemple, qui implique un changement dans la vitesse de circulation. Pour appréhender l'évolution d'un phénomène, différents types de modèles peuvent être utilisés selon le type de changement auquel on a à faire. L'expression de la variation dans le temps prendra alors une forme linéaire, exponentielle voire logistique, c'est-à-dire avec des paliers de limitation de croissance (Pumain, Saint-Julien 2001 : 140). Ce type de modèle qui intègre le temps est particulièrement intéressant pour les problématiques archéologiques, dans la mesure où il peut mettre en évidence, par comparaison entre diverses régions ou périodes, des rythmes différents dans le changement d'organisation spatiale du peuplement.

- ***Diffusion***

Deux modèles, appliqués à l'étude de l'étalement urbain, abordent les processus de diffusion spatiale en recourant à la géométrie fractale. Basée sur la non-homogénéité, la géométrie fractale est particulièrement adaptée à l'étude des tissus urbains, hétérogènes, dont la progression n'est pas linéaire. Il s'agit de mettre en évidence des régularités géométriques dans des systèmes qui apparaissent irréguliers au départ. Le logiciel d'analyse morphologique Fractalyse, développé par Pierre Frankhauser (UMR 6049 THEMA, Besançon), permet d'identifier la structure d'un tissu urbain par rapport à des modèles géométriques connus (Tapis de Sierpinski, Poussière de Fournier...). Par comparaison, il est ensuite possible de repérer les phénomènes de progression hiérarchique et les ruptures existant dans l'organisation spatiale étudiée.

Dédié à la simulation, le modèle Fractal, conçu par Éric Bailly (UMR 6012 ESPACE, Nice), permet de simuler de manière dynamique, dans l'espace et dans le temps, une croissance urbaine. Des paramètres d'anisotropie spatiale peuvent être intégrés au modèle, comme par exemple un facteur relatif à la déclivité des pentes ou au passage d'un cours d'eau, qui sont susceptibles de conditionner l'étalement urbain. Un exemple de simulation nous a été présenté pour la ville de Marseille. Le point de départ correspond au plan de la ville en 1920 qui, après plusieurs itérations, c'est-à-dire plusieurs applications du même modèle, aboutit à un plan simulé que l'on peut comparer au plan actuel de Marseille. L'intérêt réside dans l'identification de divergences qu'il faut tenter d'expliquer par d'autres variables que celles qui sont intégrées dans le modèle.

Cette application est très séduisante pour l'archéologue dans le sens où il serait imaginable d'opérer non pas une agrégation, mais une désagrégation selon un processus fractal qui nous permettrait de simuler un état antérieur au plan de départ. Une telle régression poussée à

l'extrême nous donnerait la possibilité d'identifier un noyau historique théorique dont l'emplacement pourrait être comparé au noyau historique connu par l'archéologie. Une analyse pas à pas de cette régression, en lien avec les différents états archéologiques connus, devrait nous permettre d'identifier les phénomènes de progression régulière et les ruptures spatiales. Cependant, la question d'une telle utilisation du modèle fractal reste très discutée par les géographes. Certains pensent qu'il est impossible d'inverser le processus fractal, d'autres que cela demande une grande réflexion, enfin quelques-uns proposent de tester... À travers cette question, c'est toute la problématique du traitement chronologique qui est apparue avec les difficultés liées aux rythmes variables du temps qui, quand on envisage ses effets sur les processus sociaux, n'est pas un phénomène parfaitement linéaire. Cela dit, cet argument, totalement recevable au demeurant, ne semblait pas poser autant de problèmes pour les modèles simulant l'avenir... (!). Il reste apparemment tout un champ de recherche ouvert pour la modélisation chronologique.

Modèles complexes

• Base de données spatio-temporelles

Le programme CDV-TS (Cartographic Data Visualization system for time-space data), développé par Jason Dykes (université de Leicester, Royaume-Uni) et Wim G. M. van des Knaap (université de Wageningen, Pays-Bas), combine des techniques de visualisation et de cartographie dynamique afin d'explorer une base de données relative aux itinéraires suivis par des individus dans un réseau spatial. Le travail présenté par Sonia Chardonnel (UMR 5038 TEO, Grenoble) concerne l'utilisation des sentiers de randonnée dans la réserve naturelle des Aiguilles Rouges (massif du Mont-Blanc). La base de données comprend une série d'informations sur le profil des individus interrogés (âge, genre, métier, etc.), sur leur perception de l'espace parcouru dans la réserve et sur la localisation des segments et points du réseau de sentiers qu'ils ont emprunté au cours de la journée. À partir de cette base de données, un modèle de cartographie dynamique permet de visualiser l'intensité de la fréquentation de chaque segment du réseau par intervalles d'un quart d'heure, ces intervalles pouvant être compilés pour travailler à l'échelle de l'heure ou de la journée. Le système ne permet donc pas une visualisation en temps continu mais selon une discrétisation temporelle très fine. Cela implique un investissement très important pour la constitution de la base de données, l'ensemble des informations devant être renseignées pour toutes les phases d'un quart d'heure.

En ce qui concerne les problématiques archéologiques, la mise en œuvre de ce système requiert une chronologie très fine associée à un appareil descriptif très précis de chaque entité traitée dans la base de données (établissement, objet, etc.). Enfin, il faut préciser que le système n'autorise pas de lacune dans la description de l'information, toutes les entités devant être renseignées de manière positive. Ainsi, si l'idée de la base spatio-temporelle est séduisante, le principe retenu paraît finalement peu adapté aux données archéologiques.

• Analyse d'image et modélisation

Christine Voiron (UMR 6012 ESPACE, Nice) a présenté une application du logiciel Micromorph à l'analyse de la dynamique du bâti urbain. Ce logiciel de traitement d'image permet, à partir des méthodes de la morphologie mathématique, de déceler les formes de structuration de l'espace générées par la dynamique du bâti. Une première étape consiste à simplifier l'image pour en dégager la structure, en procédant par érosions successives du tissu urbain pour ne conserver que les noyaux urbains les plus importants (granulométrie urbaine).

La croissance urbaine est ensuite simulée en choisissant un processus de diffusion du bâti, soit par dilatation géodésique des noyaux originels, soit par adjonction de points aléatoires entre ces noyaux. Dans chaque cas, il est possible d'imposer certaines contraintes de diffusion du bâti (extension limitée à certains types de relief, aux zones constructibles, probabilité accrue de diffusion autour des axes routiers importants, etc.).

Christiane Weber (UMR 7011 Images et Ville, Strasbourg) a présenté des exemples d'utilisation des images satellitales en modélisation. Après analyse, une généralisation spatiale de l'information contenue dans l'image satellitale peut permettre de simuler l'évolution d'un phénomène, comme par exemple la croissance urbaine, l'extension d'un type de végétation ou l'impact du bâti sur les mesures de pollution de l'air en milieu urbain, en introduisant dans le modèle un certain nombre de contraintes. Dans le cas du projet sur la pollution de l'air de la ville de Strasbourg, il faut noter les difficultés de l'étude liées à l'insuffisance numérique des stations de mesures qui ne permettaient pas de généraliser les données sur l'ensemble de l'espace urbain considéré. Dans ces conditions, la solution adoptée consiste à implanter des stations de mesure virtuelles en fonction de paramètres contextuels similaires aux véritables stations (orientation, hauteur des bâtiments environnants, matériaux de construction utilisés...). Ce type de procédé permettant de palier l'insuffisance d'enquête ponctuelle pourrait avoir un écho en archéologie, notamment dans le cadre d'études palynologiques au niveau régional avec la création de « sondages virtuels » en fonction des ambiances environnementales (orientation, altitude, pente, vents dominants...). Une telle modélisation implique évidemment une démarche exploratoire avec un retour régulier sur le terrain afin de vérifier autant que possible les situations virtuelles et réelles.

• *Systèmes Multi-Agents et Automates cellulaires*

Issus de la recherche en intelligence artificielle, les Systèmes Multi-Agents (SMA) et les Automates cellulaires permettent de simuler la genèse d'une structure spatiale en se plaçant au niveau micro, c'est-à-dire au niveau des individus – ou agents –, dont les interactions provoquent des organisations spatiales.

La structuration de l'espace n'est donc pas introduite a priori dans le modèle, mais ce sont au contraire les processus de son apparition qui sont ici étudiés. Dans un SMA, les agents sont des individus (personnes, animaux, etc.) mobiles et autonomes, dotés de connaissances, de compétences et d'objectifs propres, qui sont capables d'agir dans un environnement et de communiquer entre eux. Dans un Automate cellulaire, les agents sont des entités spatiales, des cellules, caractérisées par un certain nombre d'attributs définissant leur état à un moment précis et dotées d'une « durée de vie » préétablie. Ce sont les interactions (dans le cas des SMA) ou les transformations d'état (dans le cas des Automates cellulaires) des agents qui introduisent la dynamique dans le modèle, la structure de l'espace évoluant à chaque mouvement ou changement d'état des agents. Ces mouvements ou transformations des agents sont conditionnés par un certain nombre de règles d'interaction¹ (SMA) ou de transition² (Automates cellulaires) définies a priori par l'opérateur. Plusieurs expériences peuvent être réalisées en

1. On peut ainsi fixer par exemple une règle de comportement individuel, sans relation entre les agents, ou au contraire un comportement collectif avec concertation des agents.

2. Les règles de transition relèvent de la théorie générale de l'interaction environnementale : le comportement d'une cellule dépend de son environnement, c'est-à-dire de l'état des cellules alentour. Les règles se présentent alors sous la forme « la création d'une zone pavillonnaire sur une (cellule en) friche dépend du voisinage d'autres pavillons, du non-voisinage d'autoroutes et de la bonne accessibilité au réseau routier ». On peut également introduire une périodicité dans la transformation des cellules (« une cellule de forêt prendra feu en moyenne une fois tous les 100 ans à condition qu'il y ait une proportion suffisante de forêt sèche dans le voisinage »).

adoptant différentes règles, de manière à évaluer leur impact sur l'organisation spatiale du phénomène étudié. À partir de ces différentes simulations, il est également possible de calculer la probabilité d'obtenir une structure particulière en fonction des règles introduites.

Les Automates cellulaires sont certainement plus adaptés au maniement de données archéologiques, dans la mesure où nous raisonnons à partir d'entités spatiales ou spatialisées (sites archéologiques ou objets inertes) plutôt que sur des individus dont les règles comportementales nous échappent très largement. L'utilisation de tels modèles pour l'étude des systèmes de peuplement nous paraît tout à fait envisageable et particulièrement prometteuse car ils permettraient un fonctionnement interactif où tous les éléments du système (= les différents établissements) joueraient un rôle dans sa structuration spatiale. Il s'agirait de formaliser nos hypothèses sous forme de règles de transition (par exemple : « des zones vides sont colonisées par de petites exploitations agricoles si le sol est de type brun calcaire peu épais et s'il existe d'autres établissements dans un rayon de 2 km »). À partir d'un état connu du système de peuplement, il serait ensuite possible de tester différentes règles de transition et d'analyser les organisations spatiales obtenues. L'objectif ne serait pas de reconstituer l'évolution réelle du système de peuplement, mais d'explorer différentes hypothèses permettant d'avancer dans la compréhension des processus de transformation du système de peuplement. En introduisant une réelle dynamique, ce type de modélisation pourrait aussi donner des éléments de réflexion sur les temporalités à l'œuvre dans cette transformation. Ces systèmes constituent donc des outils d'analyse exploratoire puissants, ne serait-ce que par la masse de données qu'ils sont capables de mobiliser de manière interactive. Il faut signaler le programme SpaCelle, développé par une équipe de l'UMR IDEES MTG de Rouen (Y. Guermond, P. Langlois et J.-L. Delahaye) dont le développement très avancé permet d'envisager rapidement une application à des problématiques archéologiques.

Quelques réflexions pour conclure...

L'intégration du temps en modélisation

Le temps peut être intégré de deux manières dans les modèles. La première consiste à comparer les situations observées à des dates différentes afin d'en tirer des conclusions sur l'évolution de l'organisation spatiale d'un phénomène dans la longue durée et sur les causes possibles de ces transformations (modélisation diachronique). La seconde approche consiste à intégrer l'évolution du phénomène dans la modélisation, en modélisant les processus de transformation d'un système spatial (modélisation dynamique). C'est ce dernier type de modélisation que permettent les Systèmes Multi-Agents et les Automates cellulaires. Toutefois, le problème qui reste posé dans ce type d'approche est celui de la signification temporelle des pas de simulation adoptés : combien de temps s'écoule à chaque transformation d'état d'un agent du système ? En outre, il faut tenir compte de la non-linéarité des processus étudiés : l'évolution d'un système n'est pas forcément régulière, mais peut connaître des accélérations, suivies de phases de plus grande stabilité structurelle, comme l'a rappelé François Durand-Dastès. En s'intéressant à des situations avérées, à l'étude de phénomènes révolus, l'archéologie pourrait fournir des éléments pour tenter de modéliser des dynamiques chronologiques à intégrer dans les systèmes de simulation.

Validation et calibrage des modèles

La question de la validation des modèles a été fréquemment abordée au cours de l'école thématique, notamment dans le rapport des résultats de la modélisation avec la réalité. Une première possibilité consiste à valider le modèle « terme à terme », c'est-à-dire en confrontant

le modèle à une nouvelle série de données collectées dans les mêmes conditions que celles utilisées pour la modélisation. On reconnaîtra que cela est difficile à mettre en œuvre en archéologie en raison de la ténuité des données initiales, généralement sollicitées en totalité pour la construction du modèle. Il reste toutefois possible d'effectuer un retour sur le terrain de manière à confirmer ou infirmer les hypothèses dégagées à l'issue de la modélisation.

Selon François Durand-Dastès, une autre approche consiste à effectuer une validation « structure par structure », c'est-à-dire à valider un modèle au niveau macro (global) et non pas au niveau de chaque élément qui compose le système. Dans ces conditions, c'est l'adéquation de la structure obtenue à l'issue du modèle avec la structure du phénomène observé qui compte, même si les données sollicitées ne sont pas « réelles ». Il s'agit de faire tourner le modèle sur une population réelle puis sur une population fictive, virtuelle, élaborée à partir des caractéristiques de la population réelle, et de comparer les résultats obtenus après chaque modélisation, au niveau de la structure spatiale du phénomène.

Enfin, il est possible d'effectuer une validation par confrontation à un autre modèle, construit empiriquement à partir de nos connaissances, comme cela fut fait pour la modélisation des réseaux d'habitats en Vauvage (Durand-Dastès et al. 1998 : 203-229).

En fonction des résultats de la phase de validation, il est possible de calibrer le modèle. Cette opération de calibrage s'effectue après identification des résidus ou écarts au modèle. L'analyse des résidus est particulièrement intéressante puisqu'elle permet de mettre en évidence les spécificités, au-delà de ce qui est banal, commun à l'ensemble des situations étudiées. Elle permet un retour soit sur la théorie de base qui fonde le modèle, soit sur le modèle lui-même. Dans le deuxième cas de figure, il s'agit de réduire les résidus en agissant non seulement sur les variables, mais en retouchant aussi les paramètres du modèle. C'est cette dernière étape que l'on nomme calibrage du modèle. On regrettera que ces deux points fondamentaux, analyse des résidus et calibrage, n'aient quasiment pas été abordés au cours de l'école thématique.

De l'usage de la modélisation en archéologie

Que l'on ne s'y trompe pas, l'objectif de la modélisation en archéologie n'est pas de restituer une réalité passée, que l'on sait hors de notre portée quels que soient la qualité des données disponibles et les outils et méthodes d'investigation utilisés. Plus modestement, il s'agit de mettre à notre disposition des éléments de réflexion permettant d'avancer dans la compréhension des phénomènes observés. La modélisation est un outil qui permet, dans une démarche exploratoire, de tester nos hypothèses, de questionner nos raisonnements, de confronter nos interprétations. C'est, selon les mots de François Durand-Dastès, l'outil d'une ouverture scientifique car il permet d'oser se poser des questions.

Le recours à la modélisation nécessite donc de formaliser nos questions et nos hypothèses en les exprimant sous forme de variables que l'on peut comparer, donc que l'on peut quantifier. Il s'agit d'attribuer un poids, une valeur à chacune de ces variables afin de les confronter. Ce procédé nous permet de fonctionner de manière systématique dans un environnement rationnel. Les données archéologiques étant souvent de nature qualitative, la procédure de quantification ne va pas toujours de soi : peut-on par exemple attribuer une valeur d'influence territoriale aux établissements en fonction de leur statut symbolique qui serait décrit par l'absence ou la présence de tombes, de nécropoles, d'édifice cultuel, de fortifications... ? En tout état de cause, quelle que soit l'option retenue dans la quantification de variables qualitatives, deux principes doivent être gardés à l'esprit :

– Le premier est que l'on se place dans un système de valeurs relatives: la position d'un individu sur cette échelle de valeurs n'a de sens que par rapport à la position de l'ensemble des individus analysés.

– Le second est la nécessité d'asseoir cette quantification sur des hypothèses clairement exprimées et justifiées par différentes connaissances, archéologiques, ethnologiques, etc.

Dans ces conditions seulement, la modélisation est un outil puissant qui autorise un réel questionnement scientifique dans une démarche exploratoire à même de nous faire progresser dans l'élaboration de nos hypothèses.

Signalons, pour terminer, qu'un CD-ROM comportant les fiches descriptives des modèles présentés au cours de l'école thématique a été distribué aux participants. Ces fiches récapitulent les principes théoriques sur lesquels repose chaque modèle, ses champs d'application, ses concepteurs, etc. et sont généralement accompagnées de figures illustrant leur mise en œuvre. Certains modèles peuvent, en outre, être téléchargés à partir du CD-ROM. Le contenu de ce CD sera bientôt disponible sur Internet (<http://libergeo.parisgeo.cnrs.fr/lib-mod.htm>).

Bibliographie

Durand-Dastès, Sanders 1985 : DURAND-DASTÈS (F.), SANDERS (L.). – L'effet régional, Reclus mode d'emploi, RECLUS, Montpellier, 1985.

Durand-Dastès et al. 1998 : DURAND-DASTÈS, FAVORY (F.), FICHES (J.-L.), MATHIAN (H.), PUMAIN (D.), RAYNAUD (C.), SANDERS (L.), van der LEEUW (S.). – Des oppidaux métropoles. Archéologues et géographes en vallée du Rhône, Anthropos, Paris 1998.

Pumain, Saint-Julien 1997 : PUMAIN (D.), SAINT-JULIEN (T.). – L'analyse spatiale, 1. Localisation dans l'espace, Cursus Géographie, A. Colin, Paris, 1997.

Pumain, Saint-Julien 2001 : PUMAIN (D.), SAINT-JULIEN (T.). – Les interactions spatiales, Cursus Géographie, A. Colin, Paris, 2001.