

Introduction

Les modèles en analyse spatiale

1. Quels modèles et quelle analyse spatiale ?

Modéliser des phénomènes et des processus spatiaux implique le plus souvent de combiner des savoir et des compétences relatifs à des domaines divers, les uns liés à la thématique de la recherche, les autres issus de l'informatique, la statistique, la physique ou les mathématiques. L'ensemble de ces disciplines ouvrent en effet des perspectives méthodologiques stimulantes pour les thématiciens s'intéressant à l'organisation de l'espace et à l'évolution de ses structures (qu'ils soient géographes, urbanistes, archéologues, économistes, écologues, agronomes etc.) et elles offrent aussi des cadres techniques utiles pour formaliser leurs modèles thématiques. Réciproquement, les thématiciens offrent des problématiques et des données permettant de mettre en œuvre et de tester des modèles théoriques mis au point par les mathématiciens, les statisticiens et les informaticiens. En conséquence, derrière le terme *modèle* utilisé par les uns et par les autres, existent des sens et des conceptions différents. En effet, si les chercheurs de différents domaines peuvent s'accorder autour d'une définition relativement générale de « modèle », par exemple «une représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre »¹, le référentiel diffère beaucoup suivant les disciplines.

¹ Définition proche de celle de P. Haggett [HAG 65] qui est utilisée par F. Durand-Dastès dans le chapitre 1.

Afin d'illustrer la variété des sens attachés au mot modèle au cours d'une même application, on s'appuiera surtout au cours des paragraphes suivants sur deux exemples concrets. Dans l'un on suppose que l'on cherche à modéliser l'évolution de la répartition spatiale du peuplement sur une durée de quelques décennies, et dans l'autre celle de l'utilisation du sol. Chacun de ces deux exemples se réfère d'un point de vue méthodologique au traitement et à la modélisation de « dynamiques spatiales ». Mais *modéliser* des dynamiques spatiales peut être compris de différentes façons : rendre compte des changements de la façon la plus claire possible; ou bien rechercher les causalités derrière la forme et la vitesse des évolutions observées. Logiquement ces deux approches, la première descriptive, la seconde explicative, sont complémentaires et doivent se succéder au cours du temps. Dans la pratique cependant, la limite entre les deux phases n'est pas toujours claire et la structure même de l'information entraîne des attitudes de recherche différentes. Si cette structure est complexe, la première étape peut représenter l'ensemble de la recherche et des travaux de modélisation, l'objectif étant de fournir une image simplifiée, souvent sous forme cartographique, d'une information complexe issue de la comparaison de plusieurs sources par exemple. Si en revanche l'information est appréhendée à travers une structure simple et relativement régulière, du type de celle de l'information statistique, la première étape est rapide et l'essentiel du travail de modélisation est lié à la seconde. Pour étudier les différentiels spatiaux en matière d'évolution de la population, le géographe construira par exemple un modèle explicatif s'appuyant sur des mécanismes qu'il sait fondateurs, le rôle de la rente foncière, les effets de compétition pour l'espace, la polarisation urbaine, l'effet dissuasif de la distance, etc. Pour étudier l'évolution de l'utilisation du sol, l'agronome développera un modèle mettant en jeu les modes et les structures d'exploitation, les spécialisations et la qualité des sols.

Dans tous les cas la première étape de la recherche consiste à identifier les objets élémentaires au niveau desquels il faut recueillir l'information. Ces objets peuvent être des pixels (analyse d'image), des ménages ou des entreprises (résultats d'enquêtes ou de recensement), des entités spatiales (unités morphologiques ou administratives). Pour étudier le système de peuplement les entités élémentaires peuvent être les communes ou les unités urbaines, pour analyser l'utilisation du sol on pourra choisir les parcelles ou les exploitations agricoles. Cette identification est plus complexe dans un contexte dynamique, les objets pouvant alors changer de sémantique (une unité urbaine en « absorbe » une autre par exemple), d'identificateur (une parcelle peut être divisée en deux) ou d'inscription spatiale (extension d'une exploitation) [CHE 95]. Les objets étant identifiés, il s'agit d'élaborer des mesures de changement qui aient du sens d'un point de vue thématique et qui soient compatibles avec l'échelle spatiale adoptée. Déjà tout au long de cette étape de formalisation de l'information, on manie des *modèles*. Il s'agit d'une part de modèles conceptuels sur le sens des indicateurs, en particulier sur le lien entre le phénomène étudié (qui réfère à un cadre *théorique*) et l'ensemble des

mesures qui en sont faites (qui renvoient à ce qui est *observable*), étant donnés les niveaux d'observation choisis. Il s'agit d'autre part de modèles de données permettant d'organiser les informations thématiques et géométriques en vue de les traiter (mode relationnel, orienté-objet, vectoriel/raster, etc.).

Une fois le modèle thématique mis au point, et l'information relevée et organisée, il s'agit de formaliser le modèle afin de le valider, de tester des hypothèses et éventuellement d'établir des scénarios pour faire de la prospective ou aider à la décision. La mise en œuvre du modèle nécessite de choisir un cadre méthodologique. Différents angles d'approche sont alors possibles, chacun associé à des savoir-faire spécifiques.

Si on adopte une optique géomatique, on développera et on utilisera les fonctionnalités des systèmes d'information géographiques (SIG) afin de mettre en relation les couches d'information liées à différents aspects du phénomène étudié et de mettre en évidence d'éventuelles régularités spatiales. On construira par exemple des requêtes permettant de repérer les parcelles se trouvant à telle distance d'un échangeur autoroutier et ayant enregistré tel changement d'utilisation du sol. Si on choisit le cadre statistique, une façon classique de procéder est d'identifier des variables « à expliquer », quantitatives (taux de croissance de la population, variation du nombre d'emploi) ou qualitatives (changement d'utilisation du sol, changement de profil économique), et des variables « explicatives » référant aux caractéristiques des communes ou des parcelles et traduisant les hypothèses formulées dans le modèle thématique. Le statisticien choisit et applique un *modèle statistique*, linéaire, loglinéaire, exponentiel, etc. en fonction de la nature statistique des variables et de leurs relations. Si on choisit de se placer dans un cadre mathématique ou physique, on peut être amené à développer un modèle relevant de la dynamique des systèmes complexes (de type proie-prédateur par exemple) et doté de propriétés de bifurcation. Une telle propriété sera particulièrement intéressante si on estime qu'il existe des effets de seuils dans les paramètres caractérisant l'environnement général du système étudié de nature à entraîner un changement qualitatif de la forme de la dynamique du peuplement. Une formalisation dans le cadre de l'intelligence artificielle amènera à utiliser les modèles d'automates cellulaires ou multi-agents et à mettre l'accent sur les propriétés d'interaction et d'émergence. On procède alors par simulations et ces modèles sont particulièrement utiles quand on cherche à établir l'effet du jeu des interactions locales sur l'évolution des structures spatiales à un niveau supérieur.

Pour le thématicien, ces différentes approches représentent un ensemble de méthodes utiles pour formaliser et tester son modèle thématique, chacune étant dotée de potentialités différentes et complémentaires. Son choix dépendra de ses compétences, de ses collaborations ou, mieux, de la correspondance entre ses propres hypothèses sur le pourquoi et le comment du changement auquel il

s'intéresse et les propriétés des modèles statistique, physique, géomatique ou informatique à sa disposition. Dans certains cas il est même amené à utiliser un enchaînement de modèles : un SIG afin de créer des indicateurs spatiaux ; un modèle statistique pour tester la significativité de la relation entre certaines des variables utilisées, ou encore pour estimer des informations manquantes ; un modèle d'équations différentielles pour gérer les évolutions globales d'un certain nombre de variables d'état ; un modèle d'automates cellulaires pour simuler les interactions spatiales locales ; un système multi-agents pour rendre compte des effets d'une coopération entre différents acteurs. Pour mettre en œuvre un modèle thématique on est ainsi amené à enchaîner, coupler, intégrer, des modèles issus de disciplines différentes et des confusions peuvent bien évidemment émerger lorsque le même mot modèle est utilisé sans l'associer à un complément qui en précise le sens.

Chacune de ces familles de méthodes a ses atouts propres et intègre la dimension spatiale des phénomènes étudiés sous des aspects différents. L'approche statistique met l'accent sur les mécanismes de covariation des phénomènes et l'espace peut être introduit dans l'analyse à travers d'une part les types d'individus statistiques traités (entités spatiales, couples de lieux) et d'autre part les variables (distances, formes d'espacement ou types de voisinages par exemple). Dans les modèles dynamiques l'espace peut intervenir de la même façon comme support si on décrit l'évolution d'entités spatiales, et également à travers un terme d'interaction, liant les dynamiques des entités entre elles (la distance ou le coût de déplacement entre deux entités par exemple). Si les automates cellulaires sont utilisés pour représenter l'espace géographique, le moteur même du changement est spatial, puisque tout changement est déterminé par la configuration du voisinage. Chacun de ces cadres méthodologiques peut être utilisé dans une optique descriptive, exploratoire ou explicative. Les frontières entre ces approches ne sont pas toujours nettes et dépendent davantage de la façon dont le chercheur met en place son dispositif méthodologique que des méthodes elles-mêmes.

La question se pose en des termes similaires pour *l'analyse spatiale*. Suivant les contextes et les auteurs, différents sens sont attachés à l'analyse spatiale dans le cadre même de la seule géographie. Certains donnent à ce terme un sens thématique fort « analyse formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace géographique, tel qu'il est produit et vécu par les sociétés humaines » [PUM 97]. D'autres mettent l'accent sur la dimension spatiale du phénomène étudié « rechercher, dans les caractères d'unités spatiales, ce qui relève de leur position géographique, en particulier relative, ce qui oblige à modéliser la structure spatiale » [CHA 95]. D'autres enfin insistent sur les aspects méthodologiques, et l'analyse spatiale désigne l'«ensemble de méthodes mathématiques et statistiques visant à préciser la nature, la qualité, la quantité attachées aux lieux et aux relations qu'ils entretiennent –l'ensemble constituant l'espace-, en étudiant simultanément attributs et localisations » [BRU 92], ou encore, avec une optique similaire, « a whole cluster

of techniques and models which apply formal, usually quantitative, structures to systems in which the prime variable of interest varies significantly across space »² [LON 96]. Les utilisateurs de SIG en revanche mettent derrière le terme analyse spatiale un ensemble de fonctionnalités comme les techniques de superposition, les fonctions topologiques et géométriques, les techniques d'interpolation, l'analyse de réseau, etc.

Ici encore il peut y avoir confusion entre des thématiciens comme les géographes qui verront dans l'analyse spatiale un cadre de pensée dans lequel les effets de position, de voisinage, de co-occurrence, jouent un rôle clé pour comprendre les interactions entre l'espace et la société, associé à des modèles spatiaux élémentaires faisant référence à la gravitation, le potentiel, et la diffusion et aux outils de la statistique spatiale (auto-corrélation spatiale, variogramme par exemple) et les utilisateurs des SIG pour qui le terme d'analyse spatiale se confond parfois avec les fonctionnalités géométriques et de superposition des SIG.

Un informaticien et un thématicien n'entendent ainsi pas la même chose derrière la formulation « modèles en analyse spatiale ». Il n'y aura pas dans cet ouvrage une discussion approfondie sur ces différences de points de vue mais un parti pris. L'objectif est de rendre compte des démarches de modélisation « thématiques » et de montrer la variété des choix méthodologiques qui sont faits dans la pratique par ceux dont l'objet d'étude a un fort ancrage dans l'espace. Toute modélisation implique une formalisation de l'information géographique mais l'accent n'est pas explicitement mis sur cette question, mais plutôt sur la formalisation des hypothèses. Il s'agit de comprendre, d'expliquer, de simuler, des organisations spatiales, des localisations privilégiées, l'émergence ou la disparition de certains phénomènes en certains lieux, des formes d'interactions entre différents lieux.

L'information géographique occupe une place centrale dans tous les travaux présentés dans cet ouvrage mais il y a peu de références explicites aux SIG. Peu visibles dans ces travaux de modélisation, ils y ont cependant une forte présence potentielle et jouent un rôle incontournable dans certaines chaînes de traitement. Certaines méthodes d'analyse spatiale utiles pour le développement d'un modèle spatial thématique existent dans le SIG ou peuvent facilement être internalisées, d'autres sont utilisés de façon complètement indépendantes ou en couplage.

² « tout un ensemble de techniques et de modèles qui appliquent des structures formelles, généralement quantitatives, à des systèmes dans lesquels la principale variable varie de façon significative à travers l'espace ».

Chacun des chapitres de cet ouvrage met en relation un champ conceptuel de l'analyse spatiale et un ensemble de méthodes et de modèles. Les champs concernent de façon large les questions de localisation et d'interaction dans l'espace, d'échelles géographiques et de niveaux d'observation, de dynamiques spatiales. Certains privilégient l'apport d'une famille de méthodes issue des statistiques, des mathématiques et de l'informatique, d'autres fondent leur présentation sur des théories profondément ancrées dans la géographie ou l'économie. Tous accordent une importance clé à l'articulation entre le sens thématique de leur étude et les propriétés de l'outil choisi. L'espace est présent à la fois comme objet : il s'agit de décrire, de comprendre, de prévoir, des localisations, des configurations spatiales et leurs évolutions ; et comme élément d'explication : il s'agit d'évaluer des effets de position et de voisinage, sur ces localisations, ces configurations, ces changements.

2. Des notions centrales et récurrentes : interaction spatiale, niveau d'observation

Tous les chapitres de l'ouvrage traitent de questions où l'espace joue un rôle clé, quelquefois en tant que support, le plus souvent avec une fonction active. En revanche les différents chapitres présentent une grande variété à la fois du point de vue des phénomènes étudiés (ruissellement, localisation des services publics, la mobilité des personnes par exemple), des outils d'analyse (analyse des données, équations différentielles, systèmes multi-agents par exemple), des échelles spatiales (de la cellule de un mètre carré au niveau national) et temporelles (de l'ordre de la minute au siècle). L'ouvrage illustre ainsi la variété des questions et des pratiques de modélisation en analyse spatiale. Au-delà de cette variété, quelques notions reviennent régulièrement, et émergent ainsi comme partie prenante de toute approche en termes d'analyse spatiale. Il s'agit des interactions spatiales, et de la notion de niveau.

2.1. La modélisation des interactions spatiales

La notion d'interaction spatiale est présente dans la plupart des chapitres. Elle est effectivement au cœur d'une démarche d'analyse spatiale. Lorsque l'on a caractérisé les lieux, que l'on a mis en évidence l'intensité et la forme des différenciations spatiales, repéré les similarités et les ruptures, il s'agit en effet de mettre en relation ces caractères de l'organisation de l'espace avec les échanges qu'entretiennent les lieux entre eux et les influences réciproques qu'ils exercent les uns sur les autres. Ces influences et ces échanges découlent de l'hétérogénéité de l'espace et à ce propos A. Franc utilise l'expression de « interactions pilotées par l'organisation spatiale » (cf. chap. 9). Réciproquement le jeu de ces interactions contribue à son

tour à produire de l'hétérogénéité. Les interactions spatiales reflètent ainsi des relations de complémentarité et/ou de concurrence entre les lieux et jouent un rôle moteur dans les transformations de l'espace et dans la dynamique des systèmes spatiaux.

L'interaction entre les lieux peut représenter l'objet même de la recherche (on cherche à expliquer pourquoi des flux sont plus ou moins importants entre plusieurs couples de lieux), ou représenter une contrainte (le déplacement d'un lieu à un autre est envisagé comme une contrainte dans l'accomplissement d'une tâche pour un acteur donné) ou bien constituer l'élément explicatif d'une dynamique (émergence ou croissance d'un phénomène en un lieu sous l'impulsion donnée par des échanges avec d'autres lieux).

Les interactions spatiales prennent ainsi des formes variées, opèrent à plusieurs niveaux et leur analyse donne lieu à différentes formalisations. Nous tentons dans les paragraphes suivants de rendre compte des grands traits de cette variété qui sont traités au fil des chapitres.

Les échanges entre couples de lieux

Dans un premier ensemble de modèles les lieux jouent un rôle symétrique, chaque lieu étant potentiellement émetteur et récepteur. Lorsque l'on étudie des échanges migratoires inter-régionaux par exemple, chaque zone considérée représente un lieu d'installation possible pour les immigrants venant d'ailleurs, et inversement c'est le lieu de départ pour un certain nombre d'habitants ayant décidé de migrer. Les modèles d'interaction spatiale les plus classiques sont destinés à exprimer l'intensité des flux ou des échanges entre un lieu d'origine et un lieu de destination en fonction des caractéristiques de ces lieux (en termes de potentiel de partants et d'attractivité du lieu d'arrivée) et d'un effet dissuasif de la distance séparant les deux lieux. F. Durand-Dastès (cf. chap. 1) utilise le modèle de gravité, un des plus classiques en analyse spatiale, pour rendre compte de ce qu'il qualifie les « universaux » de la modélisation. L'auteur met plus généralement en relation interaction et causalité, et souligne le rôle de la réflexion sur l'interaction spatiale dans l'adoption d'un mode de formalisation systémique en analyse spatiale.

Les échanges entre les lieux peuvent être matériels ou immatériels, s'exprimer sous forme quantitative (quantité de migrants) ou qualitative (existence d'une relation aérienne) et on peut en rendre compte à partir de modèles sagittaux, chorématiques ou matriciels. La combinaison de l'ensemble des interactions spatiales opérant à un niveau élémentaire conduit parfois à l'émergence de structures spatiales complexes. P. Frankhauser et D. Pumain analysent l'apport des fractales dans l'étude de telles structures (cf. chap. 10).

Les échanges entre lieux de statut différent

Un certain nombre d'interactions sont en revanche dissymétriques d'un point de vue sémantique et mettent explicitement en jeu les différences de statut entre les lieux considérés. Tel est le cas des phénomènes de diffusion, avec un ou certains lieux considérés comme émetteurs privilégiés (d'une information, d'une innovation, d'un germe) alors que les autres lieux constituent les supports des récepteurs, des adoptants, des contaminés. Tel est encore le cas lorsque l'on considère des consommateurs, appréhendés à leur lieu de résidence, recherchant un service localisé : école, crèche, hôpital, déchetterie etc. Suivant la question posée, différentes formalisations sont possibles. Il s'agit d'abord de déterminer à quel niveau géographique le lieu de départ (disposant de l'innovation ou abritant la population exprimant une demande potentielle) doit être considéré : l'immeuble, l'îlot, la ville ou une zone plus vaste (le plus souvent une zone administrative dans les applications). Les lieux d'arrivés peuvent être identifiés par des entités de même nature, ou simplement repérés par des points localisés lorsqu'il s'agit d'un service par exemple. Il s'agit ensuite de déterminer un modèle adéquat pour rendre compte des interactions et de leurs conséquences sur l'organisation de l'espace et sur ses dynamiques.

Dans le chapitre 3, D. Peters et I. Thomas présentent des modèles permettant de déterminer les localisations optimales de services publics étant donnée la répartition de la population concernée par ces services. Plutôt que le terme d'interaction, ils évoquent l'idée d'une *adéquation spatiale* entre l'offre et la demande de services. Le chapitre 4 de Th. Saint-Julien est consacré aux phénomènes de diffusion spatiale et à leur formalisation. L'idée est qu'un certain nombre de transformations de l'espace sont dues à des effets d'influence qui opèrent par « contagion ». Le phénomène peut être physique, comme la propagation d'une espèce végétale ou d'une maladie, ou social, à travers des comportements d'imitation, dans des domaines aussi variés que l'innovation en matière agricole ou en matière d'architecture, et les comportements en matière de fécondité. Les formalisations les plus classiques, développées dans les années 1950, restent valides aujourd'hui sur le plan conceptuel, avec des possibilités techniques d'application très élargies.

Dans le chapitre 5, S. Chardonnel montre comment les principes de la time-geography sont utilisés afin de simuler l'impact d'un changement dans le réseau des transports en commun sur les possibilités individuelles de réaliser des trajectoires spatio-temporelles. L'interaction spatiale prend la forme de suites de déplacements, par exemple « domicile-crèche-lieu de travail-crèche-domicile », respectant certaines contraintes d'horaires et de durées de présence en certains lieux. La perspective est celle de l'individu soumis à des contraintes spatiales (atteindre une destination en passant par des lieux de passage obligé -la crèche-) et temporelles (respecter les horaires d'ouverture de la crèche et la durée du temps de travail).

Les chapitres 3 et 5 illustrent bien combien, face à une thématique semblable qui est celle de l'accès à un service, le modèle adopté va dépendre de la perspective de recherche dans laquelle on se place : dans un cas il s'agit d'optimiser la localisation d'un ensemble de déchetteries, dans l'autre l'accès à la crèche joue un rôle de contrainte sur les déplacements individuels domicile-travail. Dans le premier cas un modèle d'optimisation est utilisé et fournit la répartition de déchetterie permettant de minimiser la somme des déplacements individuels. Dans le second, les lieux de résidence et de crèche sont fixés et des simulations reposant sur des règles logiques mettant en jeu horaires et durées sont utilisées afin de tester l'impact d'améliorations des transports en commun en termes de fréquence sur l'éventail des possibilités individuelles.

L'influence exercée par un lieu sur les lieux voisins

L'interaction spatiale peut également s'exprimer sous la forme d'une *influence* d'un lieu sur un autre sans être explicitement matérialisée par un échange ou un flux mesurable. Les automates cellulaires sont souvent utilisés pour formaliser l'effet de telles influences sur le changement local et simuler les configurations spatiales qui en découlent au niveau global. Dans le chapitre 8 F. Dureau et C. Weber présentent un modèle d'évolution de l'utilisation du sol au niveau du pixel dans un état d'esprit similaire. L'utilisation du sol y est identifiée à partir de l'analyse d'une image satellite, puis le potentiel de changement d'utilisation du sol est déterminé au niveau de chaque pixel en fonction des utilisations du sol des pixels environnants, l'intensité de l'influence diminuant avec la distance. Les auteurs utilisent ce modèle pour simuler l'extension du bâti sur les franges de Bogota.

H. Mathian et M. Piron (chapitre 2) se sont également concentrées sur la formalisation des conséquences des relations de proximité. Ces relations sont le fruit de ressemblances ou au contraire d'oppositions entre les lieux, et la structuration spatiale associée peut être mise en évidence à partir de statistiques locales. De telles influences peuvent fonctionner suivant une logique de couples de lieux (ce qui se passe en un lieu A dépend des caractéristiques d'un lieu B) ou suivant une logique de « contexte » (ce qui se passe en un lieu A dépend des caractéristiques générales de l'environnement dans lequel le lieu A est situé). Les auteurs montrent l'apport du formalisme statistique pour décrire et éventuellement expliquer la résultante de ces jeux d'influence sur la forme et l'intensité des différenciations spatiales. Une formalisation mathématique des mêmes phénomènes est donnée au chapitre 9, en axant davantage sur les aspects dynamiques des interactions. Les coordonnées géographiques des entités spatiales modélisées jouent alors le rôle de paramètres du système spatio-temporel auquel on s'intéresse.

Interaction entre acteurs, groupes d'acteurs et environnement

Dans tout le paragraphe précédent on a mis l'accent sur l'interaction spatiale en tant qu'interaction entre des *lieux*. Cette expression, qui se réfère plutôt à une logique agrégée, est utilisée afin de mettre l'accent sur les logiques spatiales, mais il est bien évident que ces interactions «entre lieux» sont le plus souvent matérialisées par des échanges entre les acteurs pratiquant ces lieux : il s'agit d'échanges entre des individus, ou bien entre des individus et des groupes, ou encore entre des individus et des établissements ou des institutions. Les chapitres 5, 6 et 7, accordent une place importante aux individus et abordent les interactions plus explicitement à ce niveau. E. Holm et L. Sanders examinent ainsi les interactions qui sont motrices dans la décision de migrer et qui devraient être intégrées dans un modèle de microsimulation: interaction de l'individu avec les autres membres du ménage, interaction avec les acteurs composant son environnement (immeuble, quartier, ville), la relation enfin avec les lieux pratiqués dans sa propre trajectoire passée (cf. chap. 6).

Une autre forme d'interaction est modélisée par plusieurs auteurs, celle qui existe entre des individus ou des groupes et l'environnement. Cette interaction s'inscrit le plus souvent dans un espace donné mais n'est pas en général décrite en termes d'interactions *spatiales*. Ces interactions homme-milieu, ou société-nature, sont plus explicitement abordées dans le chapitre 7. J-P. Treuil, C. Mullon, E. Perrier et M. Piron y traitent de l'utilisation des systèmes multi-agents pour simuler des dynamiques spatialisées, le moteur du changement opérant principalement par l'interaction entre agents. Les interactions sont appréhendées dans toute leur diversité fonctionnelle : résolution de problèmes informatique, simulation de processus de négociation et de coopération entre des acteurs, gestion de l'évolution de mondes artificiels composés d'acteurs et de ressources en interaction.

2.2 De l'individu au groupe, du pixel aux zones, de l'élément à l'agrégat : la question du niveau d'observation et de modélisation

Deux questions sont essentielles dans ce domaine : quel est le niveau d'observation adéquat par rapport à la question à résoudre ? Quels sont les passages possibles, d'un point de vue sémantique et méthodologique, entre des niveaux différents ? Aucun chapitre n'échappe bien sûr à la première de ces questions et plusieurs abordent explicitement la seconde.

Le choix d'un niveau d'observation

La première étape de nombreux travaux de recherche consiste à s'interroger sur le meilleur niveau d'observation à adopter relativement à l'objectif de l'étude entreprise. La formulation même de la question entraîne quelquefois une réponse évidente : si on recherche les déterminants individuels du choix du mode de déplacement entre le domicile et le lieu de travail, le niveau de l'individu s'impose ; il en est de même lorsque l'on s'intéresse au comportement de parents-actifs dans la gestion de leur espace-temps quotidien (cf. chap. 4) ; en revanche si on s'interroge sur la barrière que peut représenter une frontière administrative ou linguistique sur les flux migratoires, un niveau agrégé paraît préférable. D'autres questions impliquent une plus grande variété de choix. Tel est le cas lorsqu'il s'agit, dans une démarche opérationnelle, de déterminer la localisation d'un service public (cf. chap. 3). Il s'agit de réfléchir, en fonction de la forme de la répartition de la population exprimant une demande, et de critères d'équité et de coûts, à quel niveau d'agrégat spatial il est judicieux de se placer pour rechercher une localisation optimale. Pour d'autres questions enfin, il peut même exister une polémique entre les chercheurs sur le niveau d'observation et de modélisation à adopter. Dans différentes disciplines il y a ainsi un débat entre ceux préconisant une modélisation au niveau le plus élémentaire et ceux proposant de développer un modèle agrégé pour rendre compte de la dynamique d'agrégats spatiaux (cf. chap. 6 et 7). Pour comprendre la dynamique d'un ruissellement faut-il suivre les entités « gouttes d'eau » ou suffit-il de formaliser la question au niveau du flux ? Pour rendre compte de la dynamique de population dans un ensemble de communes, faut-il formaliser les choix migratoires des individus ou chercher à modéliser des régularités inter-communales en matière d'attractivité résidentielle ? Si la question est courante entre le niveau des individus et le niveau des agrégats spatiaux, elle se manifeste aussi, et parfois plus subtilement, dans le choix d'un niveau d'organisation du territoire plutôt qu'un autre (cf. chap. 2).

Articulation de différents niveaux d'observation et de modélisation

Dans un certain nombre de cas il ne s'agit pas d'opérer un choix, mais au contraire d'utiliser simultanément plusieurs niveaux dans une perspective heuristique. Ainsi le sens même à la fois des attributs et des questions posées peut varier lorsque l'on parcourt les différents niveaux de l'échelle géographique. Les auteurs du chapitre 2 passent en revue différentes façons d'appréhender plusieurs niveaux d'observation dans le cadre d'une étude. Il peut s'agir de comparer les logiques de répartition d'un phénomène suivant différentes partitions de l'espace, une telle comparaison permettant de mettre en évidence les échelles de la différenciation spatiale étudiée (de différentes formes de ségrégation par exemple). On peut aussi comparer la forme d'une relation statistique entre deux phénomènes

quand on change de niveau d'observation. Celle-ci peut être stable ou au contraire révéler des changements marqués. Ce dernier cas pose des problèmes du point de vue statistique puisque les résultats dépendent alors du niveau d'observation choisi [FOT 91] mais il informe sur la structuration des différenciations spatiales, sur les échelles où opèrent différentes formes de combinaison des facteurs étudiés.

Une question proche est traitée dans le chapitre 9 à travers les notions de transfert d'échelle et d'agrégation parfaite. L'auteur évoque une pratique courante en recherche, en écologie végétale par exemple, consistant à développer un modèle à partir de données et de mécanismes valides à une échelle fine afin de répondre à des questions se posant à un niveau beaucoup plus global. Il souligne le décalage qui existe souvent entre le niveau où un modèle est validé et le niveau auquel on dispose des données. De tels procédés demandent une connaissance précise du lien entre les échelles, du point de vue empirique comme théorique. L'agrégation parfaite du point de vue mathématique (impliquant par exemple que si les moyennes calculées sur deux ensembles d'éléments sont égales à un moment donné, elles le resteront) est rarement observée dans les faits. Quand on modélise la dynamique d'un système spatial, on suppose au contraire souvent que les différenciations spatiales jouent un rôle moteur dans l'évolution du système, on s'intéresse à l'émergence de nouvelles différenciations spatiales et le passage d'une échelle à l'autre ne peut alors être formalisé de manière simple. La modélisation informatique, notamment l'usage des systèmes multi-agents (SMA), offre une souplesse plus grande pour gérer les interactions entre des objets de différents niveaux, cette souplesse se payant néanmoins par des difficultés plus importantes de validation (cf. chap. 7).

La question de l'emboîtement des échelles est également au cœur de l'approche fractale qui s'intéresse aux mécanismes produisant des structures similaires à différents niveaux d'organisation du territoire (cf. chap. 10). Les auteurs présentent plusieurs méthodes permettant de caractériser de telles structures, et surtout de repérer des seuils dans l'espace correspondant au passage d'un type de structure à un autre (méthode utile pour délimiter différents types de bâtis périurbains par exemple). Ce type de mesure est également utile pour caractériser et comparer les structures simulées par des modèles dynamiques (DAU 95) et les structures spatiales observées.

Une autre approche consiste à formaliser simultanément, au sein d'une même démarche, des mécanismes relatifs à différentes échelles. On peut les intégrer au sein d'un même modèle, avec par exemple des choix migratoires formalisés au niveau des individus et des attractivités résidentielles formalisées au niveau des communes (cf. chap. 6). On peut aussi coupler des modèles opérant en parallèle. On simule par exemple d'un côté le potentiel de changement de l'occupation du sol dans une cellule en fonction de son voisinage, et de l'autre les préférences des individus pour un choix résidentiel (cf. chap. 8). Dans chacun des cas la difficulté

consiste à avoir des hypothèses sur la forme de la rétroaction entre les deux niveaux pris en compte.

Les approches multi-échelles et la modélisation des interactions spatiales constituent ainsi des fils directeurs forts de cet ouvrage. Partant de thématiques et d'objets différents, les auteurs se retrouvent autour de questionnements liés à l'organisation de l'espace et à son rôle dans la dynamique des phénomènes étudiés. La variété des appartenances disciplinaires et des entrées sur l'espace permet de donner une idée de la richesse du champ de l'analyse spatiale et montre l'intérêt d'une approche inter-disciplinaire dans ce domaine.

Références :

- [BRU 92] BRUNET R., FERRAS R., THERY H., *Les mots de la géographie*, Collection Dynamiques du territoire, RECLUS-La documentation Française, Paris, 1992.
- [CHA 95] CHARRE J., *Statistique et territoire*, Collection espaces mode d'emploi, RECLUS, Montpellier, 1995.
- [CHE 95] Cheylan J-P., Lardon S., Mathian H., Sanders L., 1995, Les problématiques de l'espace et du temps et les SIG, *Revue Internationale de Géomatique*, vol.4, n°3-4, p.287-305.
- [DAU 95] Dauphiné A., *Chaos, fractales et dynamiques en géographie*, RECLUS, Espaces modes d'emploi, Montpellier, 1995.
- [FOT 91] FOTHERINGHAM A.S., WONG D.W.S., « The modifiable areal unit problem in multivariate statistical analysis », *Environment and planning A*, p. 1025-1044, 1991.
- [HAG 65] HAGGETT P., *Locational analysis in modern geography*, London; Arnold, 1965.
- [LON 96] LONGLEY P., BATTY M., "Analysis, modelling, forecasting and GIS technology", in Longley P., Batty M. (eds.), *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, p.1-15, Wiley, 1996
- [PUM 97] PUMAIN D., SAINT-JULIEN T., *Analyse spatiale (1)*, collection CURSUS, Armand Colin, Paris, 1997.