

GEOGRAPHIE QUANTITATIVE ET ANALYSE SPATIALE : QUELLES FORMES DE SCIENTIFICITES?¹

Lena SANDERS²

La géographie recouvre un champ de recherche relativement large et varié et elle ne connaît pas les mêmes convergences méthodologiques que par exemple l'économie. Différentes approches et formes de scientificité se côtoient et les objets d'intérêt relèvent aussi bien des sciences de la nature (climatologie, biogéographie) que des sciences sociales (géographie urbaine, géographie sociale par exemple). Certaines questions chères aux géographes sont d'ailleurs à l'interface de ces champs, tel est le cas des problématiques relevant de l'environnement et du développement par exemple. Comme l'indique le titre, le choix a été fait dans cette contribution au débat, de concentrer la réflexion sur certains courants de la géographie, ceux qui ont été les plus concernés par ce qui a été qualifié de « scientification ». Il s'agit de montrer, à partir des pratiques des géographes en matière de quantification et de modélisation, quelles formes de scientificité se dessinent et de les comparer à d'autres pratiques de scientificité en sciences sociales, notamment en économie. La pratique de la modélisation est relativement courante dans la discipline depuis une cinquantaine d'années, mais sous des formes qui ont varié au cours du temps. Elle est en général le fruit du transfert de concepts et de méthodes développés dans d'autres champs disciplinaires, pour être adaptés aux problématiques géographiques. Ces transferts proviennent de la statistique d'abord, puis de la physique, et plus récemment du champ interdisciplinaire des sciences de la complexité. Les différents apports conceptuels et méthodologiques qui en sont issus se révèlent complémentaires et participent à l'évolution de plusieurs champs de recherche en géographie qui sont fortement structurés par l'approche systémique.

1. Quelques périodes clés dans la « scientification » de la géographie : de la géographie quantitative à l'analyse spatiale

Il ne s'agit pas ici de faire un historique de la scientification de la géographie, il existe plusieurs travaux resituant ce processus dans l'évolution de la géographie, mais plutôt de pointer quelques périodes-clés avant de proposer une analyse plus précise de certains tournants et de leurs implications en matière de construction de la connaissance.

Le grand tournant se situe dans les années 1950-60 aux Etats-Unis. On reprochait à la géographie d'être « non scientifique », de décrire sans proposer d'explication sur les processus et les phénomènes étudiés. Il y avait un fort désir de changer les pratiques de la discipline, d'introduire le « scientific thinking », de faire de la géographie une science. Il s'agissait de passer d'une approche idiographique, alors dominante, à une démarche plus nomothétique, avec l'ambition de mettre en évidence des régularités dans l'espace géographique, d'identifier des lois. La quantification est déjà largement développée, mais elle procède au travers de chiffres bruts, au service d'une démarche très descriptive. L'adoption des méthodes statistiques permettra une approche synthétique, répondant aux besoins des chercheurs peu outillés jusque là pour appréhender de grandes masses d'informations chiffrées. Enfin et surtout, est introduite la démarche hypothético-déductive dans la discipline. On passe d'une géographie des lieux (l'espace est appréhendé comme une collection de lieux) à une géographie de l'interaction spatiale (l'espace en tant que système) (Robic 1990).

¹ Texte paru dans « Les sciences humaines sont-elles des sciences ? » sous la direction de Thierry Martin, Paris, Vuibert, 2011.

² UMR Géographie-cités, Université Paris 1 – CNRS – Université Paris 7

Pourtant, des travaux à caractère théorique sur l'organisation de l'espace géographique avaient été réalisés bien avant. On peut citer Von Thünen, économiste, qui a modélisé dès 1826 la configuration spatiale des utilisations du sol autour de la ville en fonction de la rente foncière et du coût des transports, et Christaller, géographe, qui proposa environ un siècle plus tard, une théorie rendant compte des espacements des villes en fonction de leur niveau hiérarchique. Cependant, ces travaux précoces, considérés comme fondamentaux par la suite et qui ont inspiré à la fois géographes et économistes spatiaux, n'étaient pas connus des géographes avant ce tournant théorique et quantitatif des années 1960. Ce mouvement, qui a été qualifié de révolution quantitative et qui a donné lieu à « the New Geography », est parti des Etats-Unis, Grande Bretagne et Scandinavie, et s'est ensuite diffusé dans l'ensemble des autres pays. L'arrivée est tardive en France et se fait grâce à des passeurs comme H. Raymond, J-B. Racine, A. Bailly, B. Marchand. La diffusion en est en revanche rapide, et donne lieu à une géographie quantitative qui se présente d'emblée comme plus intégrative, moins mathématique, plus systémique que dans les pays anglo-saxons. Décrivant l'histoire de ce mouvement, D. Pumain et M-C. Robic (2002) soulignent qu'il n'a rien d'institutionnel, qu'il est porté par une communauté de chercheurs jeunes, pas encore professeurs, assez féminine, dans laquelle le rôle de la province est moteur (Groupe Dupont³), et qu'il s'est en grande partie auto-organisé. Une « géographie théorique et quantitative » se développe donc en France à partir des années 1970, mais si ce courant se renforce, l'expression elle-même ne fait pas consensus.

« Le progrès de la science a permis de généraliser l'emploi raisonné et mesuré de la mesure et de la méthode hypothético-déductive, et dès lors de se débarrasser d'un adjectif erroné et inutile : la « géographie théorique et quantitative » des années 1960 à 1980 n'a plus de raison d'être : on n'imagine pas, en effet, une science qui ne s'efforcerait pas de mesurer du mieux possible ce qu'elle avance, et de s'appuyer sur de solides théories, que ses développements contribueront à transformer ». (Brunet et al., 1992)

Pour d'autres cette terminologie est chargée d'une connotation négative, évoquant un néo-positivisme qui empêcherait d'intégrer d'autres tournants. Cette terminologie paraît plus assumée par la géographie anglo-saxonne dont des ouvrages récents comprennent l'expression « quantitative geography »⁴ dans leur titre (Fotheringham et al., 2000 par exemple), mais il y existe par ailleurs des barrières plus étanches qu'en France entre les différents courants traversant la discipline. C'est l'expression « analyse spatiale » qui va rapidement dominer pour désigner ce champ de recherche, qui est du coup partagé avec d'autres disciplines. Nombreuses sont en effet celles pour lesquelles la dimension spatiale du phénomène étudié fait sens. Il n'y a cependant toujours pas consensus sur le contenu que cette expression désigne comme l'illustrent les trois définitions suivantes :

- « whole cluster of techniques and models which apply formal, usually quantitative, structures to systems in which the prime variables of interest vary significantly across space »⁵ (Longley, Batty, 1996)

³ Il s'agit d'un réseau de recherche qui a été à l'initiative des colloques Géopoint qui ont lieu à Avignon tous les deux ans depuis 1976, organisés autour de thématiques innovantes en géographie

⁴ Le décalage entre l'utilisation de l'expression dans les langues française et anglaise ressort d'autant plus si on la compare avec les champs de la sociologie et de l'histoire. Le nombre d'occurrences obtenues lors d'une recherche sur Google l'illustre bien :

Géographie quantitative : 1 070	Quantitative geography : 15 400
Histoire quantitative : 8 260	Quantitative history : 16 100
Sociologie quantitative : 5 120	Quantitative sociology : 6 160

⁵ « tout un regroupement de techniques et de modèles qui appliquent des structures formelles, généralement quantitatives, à des systèmes dans lesquels les principales variables retenues évoluent de façon significative à travers l'espace »

- « 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. » (Charre, 1995)
- « Analyse formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace géographique, tel qu'il est produit et vécu par les sociétés humaines » (Pumain, Saint-Julien, 2001)

La première adopte une entrée clairement méthodologique, avec l'idée d'une approche formelle, tout en insistant sur les notions de système et de différenciation spatiale. La seconde, particulièrement ciblée et synthétique, entre par les « unités spatiales » qui apparaissent ainsi comme les objets privilégiés de l'analyse spatiale, et les associe à une démarche qui se veut d'emblée explicative et modélisatrice. La troisième définition est plus générale en choisissant de faire référence à l'espace géographique en y associant une forte dimension thématique. L'analyse spatiale est tout cela et il est intéressant à ne pas la réduire à ses seuls aspects techniques même si les avancées des deux dernières décennies sont surtout dues à l'articulation de l'informatique et de la géographie et aux progrès des sciences de l'information géographique (systèmes d'information géographique –SIG–, géostatistique, modèles agents, modélisation participative, géosimulation etc).

Pour discuter des formes prises par la scientification de la recherche en géographie, j'ai choisi trois entrées. La première consiste à interroger les pratiques de recherche associées à la « révolution quantitative » déjà évoquée plus haut et à évaluer en quoi elles sont porteuses de scientificité. La seconde repose sur la comparaison des démarches de la « géographie économique » et de « l'économie géographique », deux champs partageant les mêmes objets de recherche mais ayant des conceptions très différentes de la scientificité. Dans la troisième, il s'agira de discuter quels changements conceptuels accompagnent la modélisation agent et la simulation informatique, pratiques de modélisation qui se renforcent depuis une dizaine d'année et qui s'inscrivent dans le paradigme de la complexité.

2. La « révolution quantitative »: deux outils clés qui ont perduré dans les *pratiques*

Les questions de recherche en géographie sont multiples et il est évidemment impossible d'en faire le tour dans cette discussion. Seuls quelques exemples seront utilisés afin d'illustrer à quelles questions les nouvelles approches méthodologiques permettent de répondre. Les premiers concernent l'étude des différenciations spatiales. Il s'agit d'évaluer leur ampleur, les configurations qu'elles engendrent dans l'espace, leur éventuelle évolution au cours du temps, leur logique. Les seconds concernent les échanges entre les lieux.

2.1 Information géographique et approche multi-dimensionnelle

D'un point de vue conceptuel il s'agissait de penser l'espace suivant une démarche nomothétique qui s'opposait à l'approche idiographique qui dominait précédemment. Sur le plan méthodologique, il s'agissait de transférer et de mettre au point des méthodes scientifiques qui permettent de décrire « objectivement » l'espace géographique et d'analyser les principes sous-tendant son organisation et son fonctionnement. La plupart des outils adoptés alors provenaient de la statistique. B. Berry fit ainsi un parallèle entre les tableaux statistiques classiques croisant « individus statistiques » et « variables » avec ce qu'il nomma la matrice d'information géographique croisant un ensemble de lieux (parcelles, quartiers, villes, pays par exemple) avec les indicateurs les caractérisant (démographiques, sociaux, économiques etc.).

Les méthodes d'analyse des données (analyses factorielles, classifications automatiques) surtout connurent un immense succès en géographie, répondant totalement aux attentes d'alors (Benzécri 1973). L'information géographique était en effet dense et

multidimensionnelle. Ces méthodes permettaient de mettre en évidence les inter-relations entre les différentes variables caractérisant les lieux et de construire des typologies régionales en fonction des ressemblances et dissemblances des entités spatiales. Ces méthodes permettent de répondre à des questions sur les différenciations de l'espace géographique, sur les configurations spatiales et leurs évolutions. Il s'agit de méthodes descriptives, répondant bien à la démarche classique des géographes ancrée dans la géographie régionale, et consistant à donner une synthèse des caractéristiques et du fonctionnement d'un territoire donné. Elles permettent de synthétiser des masses importantes d'informations et donnent très naturellement lieu à des représentations cartographiques qui servent d'appui au discours du chercheur sur l'organisation de l'espace géographique. Ces méthodes répondaient ainsi à un besoin, elles correspondaient à des pratiques de description, à un désir d'exhaustivité, mais elles ont aussi contribué à faire évoluer ces pratiques. Elles ont permis de mettre en évidence des régularités fondamentales, de montrer comment certaines configurations spatiales tendent à se reproduire quel que soit le contexte (l'organisation centre/périphérie des villes suivant le cycle de vie de ses habitants, alors que les divisions sociales correspondent à une partition par secteurs par exemple).

Les modèles statistiques (régression, modèle logistique) ont connu une diffusion bien moindre dans la géographie française, et ont souvent été utilisés comme des statistiques descriptives plutôt que suivant la démarche hypothético-déductive qui est pratiquée en économétrie et qui a été adoptée plus systématiquement par les géographes anglo-saxons. L'objectif est de rendre compte des corrélations entre les configurations spatiales correspondant à différents facteurs et ainsi « d'expliquer » sur un plan statistique les structures sous-jacentes à certaines variations spatiales.

Parallèlement à ces travaux sur la différenciation spatiale, on s'est intéressé aux interactions entre les lieux.

2.2 Lois et modèles de l'interaction spatiale

Pour Tobler (1970), la première « loi » en géographie est relative au rôle de la distance : « Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things »⁶. Le modèle le plus utilisé tant en matière de recherche que dans le domaine appliqué (géomarketing par exemple), est le modèle de gravité, ainsi appelé par analogie avec le modèle de Newton. Utilisé dès 1929 pour délimiter les aires d'influence des villes (Reilly 1929), il est incontournable dès que l'on s'intéresse à une question où plusieurs lieux sont en interaction, que ce soit par le biais de migrations, d'échanges commerciaux, de trafic aérien, routier ou ferroviaire. Il porte ainsi sur un objet de recherche central en géographie, celui de la mobilité spatiale (des personnes, des biens, des informations). On s'intéresse d'ailleurs aussi bien aux interactions elles-mêmes, à leur intensité, à leur direction, qu'aux effets de ces interactions sur les lieux qu'elles lient.

Le modèle exprime l'importance du flux F_{ij} entre deux entités géographiques i et j (pays, régions, villes, quartiers suivant la problématique) en fonction du produit des « masses » M_i et M_j de ces entités (poids démographique ou économique par exemple) et inversement proportionnel à la distance d_{ij} les séparant (distance en km, en temps, en coût suivant les applications). Une formulation un peu généralisée en est :

$$F_{ij} = k M_i^a M_j^b / d_{ij}^c$$

Où:

k , a , b et c sont des paramètres. Celui qui a donné lieu au plus d'attention en géographie est « c » qui désigne l'effet dissuasif de la distance, et exprime la sensibilité à la distance des

⁶ « Chaque chose est liée à toutes les autres, mais les choses proches sont plus liées que les choses lointaines »

acteurs qui sont à la base du déplacement entre i et j . Si c vaut 0, la distance géographique n'influe pas sur le volume des échanges.

Rarement un modèle a été à la fois autant appliqué et autant critiqué. Chacun constate que les résultats empiriques sont excellents, mais les uns lui reprochent de faire implicitement référence à des individus rationnels et homogènes, et d'autres au contraire de ne pas expliciter les fondements théoriques relatifs aux comportements des entités élémentaires, agents économiques et acteurs sociaux, composant les flux. Différentes voies ont donc été explorées pour renforcer les assises théoriques de ce modèle. Certains ont proposé une formulation probabiliste afin d'offrir une interprétation au niveau individuel, en exprimant la probabilité pour qu'un individu résidant en i se rende à la destination j pour réaliser son objectif (à définir en fonction de l'application) plutôt qu'à une autre des n destinations possibles. D'autres ont fait référence aux théories de l'information pour proposer une formulation générale à partir de la maximisation de l'entropie (Wilson, 1970). Stouffer (1940) a mis en avant les « opportunités interposées », i.e. l'opportunité que représente la première occurrence du service recherché. Dans le domaine du commerce international les économistes ont longtemps été gênés par ce paradoxe d'un modèle donnant de bons résultats empiriques mais n'étant pas conforme à la théorie économique dominante dans le domaine. Dans les années 1980 Helpman et Krugman (1985) proposent un nouveau cadre théorique compatible avec la loi gravitationnelle et reposant sur l'hypothèse que les agents économiques aiment la variété et qu'un pays i importe de ce fait d'autant plus de produits d'un pays j qu'il existe de variétés de biens dans celui-ci. Ces débats menés par les économistes n'ont en revanche pas pénétré les travaux des géographes dont les préoccupations ont été autres.

Prenons le cas des migrations résidentielles entre les régions françaises qui ont souvent été modélisées avec des modèles de type gravitaire. Chaque flux de migrants est composé d'un certain nombre d'individus dont les raisons de migrer sont d'une grande variété. Les raisons de quitter un lieu peuvent être familiales ou professionnelles, le choix d'une destination plutôt que d'une autre peut relever de contraintes (opportunité d'emploi par exemple) ou de l'aspiration personnelle (attrait pour un certain cadre de vie). Cependant quelles que soient ces raisons, et sans chercher à identifier le moteur propre à chaque trajectoire migratoire, il reste qu'au-delà de la variabilité inter-individuelle (en matière de raisons), les plus grands nombres effectueront des déplacements courts, et les flux de longue distance seront plus faibles.

C'est un peu le raisonnement de Sherlock Holmes à qui Sir A.C. Doyle fait dire :

« While the individual man is an insoluble puzzle, in the aggregate he becomes a mathematical certainty. You can, for example, never fore-tell what any one man will do, but you can say with precision what an average number will be up to. Individuals vary, but percentages remain constant »⁷. (Sir A.C. Doyle, cité par Haag 1989)

Et les causes peuvent en être multiples : est-ce l'éloignement en tant que tel qui intervient, ou plutôt ce qui accompagne l'éloignement ? la différence culturelle, administrative, environnementale etc.

Les géographes français ont adopté une attitude pragmatique reposant sur une approche en deux temps, correspondant à deux niveaux d'explication. Partant de l'idée que le modèle exprime un fait empirique universel mais banal, il est utilisé comme un « filtre » (Durand-Dastès, 1992). La priorité n'est ainsi pas la validation des principes gravitaires, mais l'identification et l'interprétation des résidus, i.e. des écarts entre flux observés et flux estimés

⁷ « Alors que l'individu est un problème insoluble, dans l'agrégation il devient une certitude mathématique. Vous ne pouvez jamais, par exemple, prévoir ce qu'un homme donné va faire, mais vous pouvez décrire avec précision ce qui se passera pour un nombre moyen. Les individus varient, mais les pourcentages restent constants ».

par le modèle, un résidu positif dévoilant un flux préférentiel et un résidu négatif révélant un effet barrière. Se succèdent ainsi la mise en œuvre du modèle, la cartographie des résidus, puis l'interprétation de cette géographie des écarts. Interprétation pour laquelle le géographe mobilise des connaissances de nature variée et relevant de niveaux géographiques différents : l'existence d'un effet barrière peut ainsi être due à une contrainte physique, culturelle ou politique commune à un ensemble de lieux ou bien ne concerner qu'un fait particulier touchant un seul couple de lieux. Le chercheur produit ainsi un discours intégrant les particularismes dans un système explicatif en essayant de leur assigner une place exacte. L'objectif principal du modèle n'est ainsi pas de lui fournir une explication, mais plutôt de mettre en évidence les vraies questions à expliquer.

En termes de scientificité il est intéressant de comparer les attitudes des économistes et géographes face à l'utilisation de ce modèle. Dans le premier cas il est essentiel de trouver une interprétation théorique au niveau des agents économiques et de valider le modèle par voie statistique, la rigueur de la procédure de calibrage étant essentielle (problème de l'autocorrélation des résidus par exemple). Dans le deuxième cas on s'intéresse essentiellement au jeu des interactions, à la structure géographique que celles-ci dessinent ainsi qu'à la mise en évidence de flux préférentiels et d'effets de barrière.

3. “Economic Geography” et “Geographical Economics”, deux conceptions différentes de la scientificité

L'intérêt pour la dimension spatiale des phénomènes sociaux est partagé avec d'autres disciplines. L'exemple de l'économie est intéressant car les débats qui ont lieu entre économistes et géographes qui s'intéressent à un même objet, la distribution des hommes et des activités économiques à la surface de la terre, sont dus à des conceptions largement différentes de la scientificité. Le débat a surtout eu lieu dans les revues anglo-saxonnes, entre d'un côté les géographes faisant de la géographie économique (*economic geographers*), et de l'autre les économistes faisant de l'économie géographique (*geographical economists*). Ce dernier champ a connu un renouveau considérable sous l'impulsion des travaux de Krugman qui proposa au début des années 1990 une nouvelle approche, « *the new economic geography* » (NEG), expression qui va d'ailleurs contribuer à l'incompréhension qui s'est installée entre les communautés scientifiques concernées. La terminologie est en effet ambiguë puisqu'elle sous-entend que Krugman réfère à la discipline géographie alors que ses travaux émanent strictement de l'économie. Comme cela l'a été suggéré par plusieurs auteurs (Olsen 2002), “*new geographical economics*” aurait été plus approprié, puisqu'il s'agit d'introduire l'espace dans l'économie. Et j'utilise dans la suite du texte l'expression correspondante en français, la « nouvelle économie géographique ».

L'argument de la scientificité derrière des postures radicalement différentes

Pour l'économiste, l'émergence de ce champ a pu se faire grâce à des avancées d'ordre méthodologique qui ont permis de prendre en compte compétition imparfaite et rendements croissants dans les modèles et ainsi de renouveler l'économie. Il s'agit de son point de vue d'une remarquable innovation dont le point de départ est une avancée sur le plan formel: « ...As long as economists lacked the analytical tools to think rigorously about increasing returns and imperfect competition, the study of economic geography was condemned to lie outside the mainstream of the profession »⁸ (Krugman 1991). La réaction d'un certain nombre de géographes illustre l'incompréhension de cette communauté devant la NEG. Ron Martin (1999), un des plus virulents débatteurs, questionne l'identité même de ce courant : “The

⁸ « ... Aussi longtemps que les outils analytiques nécessaires pour réfléchir avec rigueur aux rendements croissants et à la concurrence imparfaite manquaient aux économistes, les études de l'économie géographique étaient condamnées à rester à l'écart du *mainstream* de la profession »

“NEG” represents a case of mistaken identity: it is not that new, and it most certainly is not geography”⁹. Au-delà de la maladresse de la terminologie choisie, laissant imaginer une intrusion des économistes dans la discipline des géographes, il y a des différences de fond sur le plan méthodologique entre les deux disciplines. La relation à la modélisation mathématique en est un des volets. Alors que l’approche modélisatrice était très présente dans la géographie économique des années 1960 et 1970, contribuant d’ailleurs à diffuser une approche formelle dans l’ensemble de la géographie, ce champ de recherche a évolué ensuite vers d’autres méthodologies plus qualitatives. Cette évolution amène Olsen (2002) à objecter que la NEG utilise “...vast simplifications that the mainstream of economic geography has not used for several decades”¹⁰. Pour le géographe la priorité est en effet de donner une “explication” du monde fortement ancrée dans l’observé, et certains doutent que la rigueur mathématique soit la piste la plus propice pour y parvenir : “.there is a suspicion that analytical elegance and tractability drive the focus of analysis rather than empirical problems”¹¹ (Clark 1998 cité par Marchionni 2004).

On se trouve ainsi dans la situation paradoxale suivante : ce qui est interprété comme une innovation scientifique par les chercheurs relevant du courant de la NEG est vu comme une régression par les chercheurs se réclamant de la géographie économique. Pour les premiers la priorité est l’existence d’un cadre mathématique rigoureux, garantie de la validité des modèles développés. Les seconds sont insensibles au caractère formel innovant, considérant que l’approche mathématisante a mené dans le passé à une impasse en termes d’avancées de la connaissance. Le rapport à la « réalité », à l’observé, est radicalement différent et le désaccord porte sur les fondements des modèles développés : “The Krugman model is for the most part a black box that occludes what by many accounts must be seen as some of the most important aspects of regional economic growth and development” (Scott, 2004). Ainsi ce qui est considéré comme simple hypothèse simplificatrice pour les uns est interprété comme le moteur même de l’explication pour les autres. Dans un cas la rigueur scientifique de la démonstration prime, dans l’autre c’est la capacité à rendre compte du « réel », à créer de la connaissance d’un point de vue thématique. Arguments « théoriques » (formels) contre arguments empiriques (thématiques).

Ces différences s’expliquent sans doute en partie par les objets et méthodes propres à chacune de ces disciplines. L’espace n’est pas au cœur du questionnement de l’économiste et la prise en compte de la dimension spatiale d’un phénomène n’apparaîtra légitime qu’à la condition que les solutions techniques pour le faire soient en adéquation avec celles utilisées dans le *mainstream* de l’économie. A l’inverse, le géographe accorde assez naturellement à l’espace, à la dimension spatiale des phénomènes de société qu’il étudie, une place privilégiée. Il sera prêt à tester une variété de méthodes, pour avancer dans la connaissance de son objet de recherche. Dans un éditorial de *Environment and Planning A*, Duranton et Rodriguez-Pose (2005), (l’un représentant de l’économie géographique et l’autre de la géographie économique), développent la métaphore des lions et des papillons pour caractériser deux approches scientifiques radicalement différentes :

“The lions/economists appear to labour the same core questions over and over again (why does economic activity agglomerate, what are the drivers of urban growth, etc), whereas the butterflies/geographers seem to enjoy exploring a much broader variety of directions and hop from question to question.... Whereas the economists/lions were busy steadily improving and expanding their tricks, geographers had become butter-flies, freely flying the fields of knowledge with the

⁹ « Il y a méprise sur l’identité de la « NEG » : ce n’est pas si nouveau, et ce n’est certainement pas de la géographie »

¹⁰ “de vastes simplifications que le coeur de la géographie économique n’a pas utilisé depuis des décennies”

¹¹ «..on soupçonne que ce sont l’élégance et la manoeuvrabilité analytique qui sont motrices dans l’analyse plutôt que les problèmes empiriques ».

aim of tasting the best from every flower they visit.”¹² (Duranton, Rodriguez-Pose, 2005).

Ces deux auteurs s'appuient sur une analyse bibliométrique des citations croisées entre une revue phare de l'économie géographique et une de la géographie économique pour souligner que l'ignorance mutuelle l'emporte sur la confrontation. Dans un cas comme dans l'autre le nombre de citations référant à l'autre courant est minimal (respectivement de 1 et 2% !). Ils soulignent par ailleurs l'opposition méthodologique entre les deux courants, les uns privilégiant une approche déductive avec un usage systématique de la formalisation mathématique, les autres diversifiant les approches, études de cas et approches qualitatives plutôt que mathématiques. La complémentarité semble évidente mais elle est dans les faits peu pratiquée. Comme le souligne Thisse (2007), la question pour la NEG est « Pourquoi y a-t-il des villes ? » alors qu'en géographie on s'interroge plutôt sur pourquoi une ville se trouve ici et pas là, et plus largement, pourquoi telle ville croît plus vite que telle autre.

Le rapport à la simplification et aux échelles de l'explication

Plutôt que d'aller au fond de ce débat, j'ai choisi de développer un point lié à la dimension multi-échelle des phénomènes de société, et de centrer la discussion sur les travaux se réclamant d'une approche quantitative. Il est en effet intéressant de montrer que l'antagonisme ne se réduit pas à une simple opposition méthodes qualitatives / quantitatives, et qu'au-delà du choix d'une approche quantitative, les démarches de construction de l'explication, et de ce fait les prises de position en termes de scientificité, sont différentes.

Si on se place dans le cadre méthodologique classique de l'économiste, il s'agit dans un premier temps de construire un modèle, rigoureux du point de vue mathématique, et compatibles avec les modèles pré-existants. Certains confrontent le modèle à des faits stylisés ou à des cas illustratifs afin d'en discuter l'intérêt potentiel pour réfléchir et tirer des enseignements sur des questions de société (des cas types qui reviennent couramment dans la littérature sont la Silicon Valley ou les districts italiens). D'autres valident leur modèle à partir d'une approche économétrique, et il s'agit alors de tester et calibrer le modèle sur des données empiriques. Ces données empiriques existent le plus souvent à un niveau agrégé, et devrait alors se poser la question du sens, pour le phénomène étudié, du niveau géographique auquel les données empiriques sont disponibles. Ne pas faire cette réflexion équivaut à faire l'hypothèse que les mécanismes opérant à différents niveaux géographiques sont similaires, ce qui peut être le cas mais est loin d'être systématique. On se trouve alors confronté à la question qui est évoquée sous le terme de MAUP dans la littérature, et qui désigne le *Modifiable Areal Unit Problem*. Le terme est proposé en 1979 par Oppenshaw et Taylor pour désigner le fait que le résultat d'un traitement statistique, d'une représentation cartographique ou de l'application d'un modèle, dépend à la fois du niveau d'observation (de la granularité, c'est-à-dire de la finesse avec laquelle on découpe l'espace) et du type de zonage de l'espace qui est utilisé (les divisions territoriales des services sociaux ne recoupent pas celles de la justice par exemple). Pour prendre un exemple simple : la corrélation entre revenus et votes est différente suivant que l'on observe ces variables au niveau de l'îlot, du quartier, de la commune ou encore du département ou de la ville.

¹² «Il apparaît que les lions/économistes creusent encore et encore les mêmes questions centrales (pourquoi les activités économiques s'agglomèrent, quels sont les moteurs de la croissance urbaine etc), alors que les papillons/géographes semblent apprécier d'explorer une plus grande variété de directions et sautillent de question en question.... Alors que les lions/économistes étaient constamment occupés à améliorer et étendre leurs recettes, les géographes sont devenus des papillons volant librement travers les champs de la connaissance avec le but de goûter le meilleur de chaque fleur qu'ils visitent ».

Cette question a donné lieu à une littérature abondante, avec différents points de vue. Le point de vue qui a longtemps été prédominant est celui du statisticien pour lequel de telles différences engendrent des *problèmes*. Il s'agit donc de mettre au point des techniques qui prennent en compte plus explicitement la dimension spatiale des phénomènes (régression spatialement pondérée par exemple, Fotheringham et al. 2001) afin de débiaiser les résultats. D'autres préconisent la seule utilisation de données individuelles (Benenson et Torrens 2004), quitte à les simuler quand elles ne sont pas accessibles. L'adoption de zonages neutres (ce qui revient à nier le rôle des entités territoriales) est une solution très explicitement évoquée par le titre « Freedom from the Tyranny of Zones : Towards New GIS-based Spatial Models »¹³ d'un article de Spiekermann and Wegener (1999). Il s'agit à chaque fois de trouver une *solution* scientifique (technique) pour ce qui est appréhendé comme un *problème*. Mais une autre position consiste à interpréter de telles différences de résultat comme signes du caractère multi-échelle du phénomène étudié, et de les utiliser afin de justement caractériser une telle multiscalarité. Dans un cas le MAUP est vu comme un problème remettant en cause la robustesse des résultats, dans l'autre comme source de connaissance sur le phénomène étudié.

Plus généralement le fait empirique n'a pas la même place dans les deux approches. Souvent appréhendé sous forme de fait stylisé par les économistes, les simplifications sont relatives à tout ce qui concerne le contexte. Cherchant à comprendre et expliquer une situation observée donnée, le contexte prend en revanche une place centrale dans l'élaboration de l'explication géographique. Dans un cas l'espace peut être appréhendé comme simple support de l'activité économique, représentable par un point abstrait, l'emprise spatiale étant sans intérêt, dans l'autre cette emprise et le contexte sont centraux, et l'espace (la position relative notamment) est alors interprété comme un véritable "acteur" de l'explication.

« Path dependency » et mémoires de l'espace (contingences et déterminismes)

Le rapport aux conditions initiales et à l'enchaînement des événements dans le temps constitue un autre exemple de hiérarchisation différente, suivant le point de vue, des faits intervenant dans l'explication d'un phénomène. Si un événement est considéré comme contingent, il est le plus souvent introduit dans les modèles au travers d'une composante aléatoire. Cependant, une fois qu'un événement s'est produit en un lieu donné A et non dans un lieu voisin B, cet état de fait tendra à influencer sur les futures trajectoires de A et de B. L'espace est porteur de mémoire (Durand-Dastès 1991) et nombreux faits sociaux s'y inscrivent durablement, se renforçant au cours du temps, ce qui fonde le principe de « path dependency » (Arthur 1994). Une fois établie en un lieu donné, une ville tendra ainsi à se maintenir et le plus souvent à se développer, son existence même renforçant l'attractivité du lieu. L'exemple de la ville de Montpellier permet de discuter les différents niveaux d'explication qui sont en jeu. La colline de Monte Pestelario est occupée par une simple exploitation agricole en 985 et 120 ans plus tard s'y trouve « un bourg opulent et fortifié » (Favory et al. 1997, p233). Aujourd'hui, avec plus de 200 000 habitants, Montpellier fait partie des grandes agglomérations françaises. Si on cherche à expliquer « pourquoi » la ville de Montpellier existe (a été créée et a perduré), plusieurs hypothèses sont possibles, chacune correspondant à un niveau d'explication :

- niveau 1. : il existait dans le contexte socio-économique de l'époque des forces centripètes qui entraînaient l'agglomération des activités et des populations (principe de base de l'économie géographique) ;

- niveau 2. : la position relative de cette localisation relativement aux agglomérations voisines correspond à une logique spatiale. C'est en effet à ce niveau que les « lois » de l'espace interviennent, induisant un certain espacement entre les villes. Cet espacement dépend de la vitesse des déplacements, et donc des technologies de transport de l'époque où

¹³ « Se libérer de la tyrannie des zones : vers des nouveaux modèles spatiaux fondés sur les SIG »

se forme la ville¹⁴. De ce point de vue les alentours de Montpellier constituent une localisation « logique » dans le semis urbain du Moyen Âge, complétant un réseau de villes en gros séparées d'une cinquantaine de kilomètres ;

- niveau 3. : La colline de Monte Pestelario offrait des conditions de site rendant possible une concentration urbaine. Il s'agit de conditions de faisabilité physique et matérielle, et des potentialités offertes par l'accès à la mer et la position avantageuse à l'interface entre mer et plateaux intérieurs ;

- niveau 4. : La famille aristocratique des Guilhem décide de déplacer le centre de gravité de son patrimoine de la haute vallée de l'Hérault pour s'établir sur la colline de Monte Pestelario et fonder la seigneurie de Montpellier (Favory et al. 1997, p233). Il y a là une décision d'acteur, un choix sans doute fait à partir d'une analyse économique avisée puisque la ville devient rapidement une des principales places commerciales de la Méditerranée.

L'ensemble de ces conditions est nécessaire pour que Montpellier devienne une ville qui perdure. Il s'agit d'explications relevant de registres différents. Pour reprendre la discussion proposée dans le prochain chapitre par G. Lenclud, le niveau 2 est proche de la démarche préconisée par Hempel alors que le niveau 4 relève de celle de Dray si on commence à s'interroger sur les *raisons* qui ont amené la famille Guilhem à quitter son chef-lieu d'origine et sur les *raisons* qui l'ont amené à choisir cette colline là plutôt qu'une autre. Les seuls niveaux 2 et 3 sont évidemment insuffisants. Il existe en effet une quantité de lieux candidats, avec un potentiel de site adéquat, mais non occupés. Relativement au niveau 2, le lieu exact de l'implantation est d'ailleurs contingent. Une différence de quelques kilomètres pour ce choix n'aurait en effet eu aucune implication sur la forme du réseau urbain sur le plan régional. Par ailleurs, le niveau 4, s'il est absolument nécessaire, ne suffit pas à lui seul. Un contre-exemple permet de l'illustrer : Aigues-Mortes, créée au XIII^e siècle par Louis IX, et fortement soutenue par lui, ne connaîtra jamais l'importance escomptée. Si des contraintes de site ont souvent été évoquées pour expliquer cet échec, les principes d'espacement relevant du niveau 2 jouent sans doute aussi un rôle essentiel : au XIII^e siècle la concurrence de Montpellier est trop forte pour que puisse se développer si près une autre place centrale.

Cette combinaison de plusieurs registres d'explication est une pratique courante pour le géographe. On l'a évoqué pour le modèle gravitaire dont les principes mêmes sont compatibles avec le modèle de Hempel, mais dont l'objectif est souvent de « filtrer » la part des interactions relevant de « lois », somme toutes banales, afin de mieux appréhender quelles sont les relations privilégiées entre les lieux ou entraînant au contraire un phénomène de répulsion, et rechercher l'enchevêtrement de « raisons » et décisions d'acteurs qui leur sont sous-jacents. Le même type de combinaison se retrouve pour toutes les problématiques qui croisent aspects naturels et sociaux, notamment dans les domaines de l'environnement et du risque. Dans leurs travaux sur le risque gélif en Champagne, les chercheurs sont ainsi amenés à articuler des modèles physiques de l'atmosphère, des modèles météorologiques statistiques, des modèles spatiaux et les stratégies des viticulteurs (Madelin, Beltrando 2005), et donc à mêler systématiquement différents registres d'explication. Une telle approche s'inscrit bien dans la démarche systémique précocement adoptée par les géographes et qui constitue toujours une approche privilégiée (Durand-Dastès, 1984). Les avancées plus récentes sur les concepts et méthodes associées aux sciences de la complexité ont permis d'aller plus loin dans cette direction.

¹⁴ NB : Les villes et villages européens sont ainsi moins espacés en moyenne que les villes et villages américains fondés plus tardivement, dans un contexte technologique plus avancé, et dans un contexte de densité générale de population plus faible.

4. Modèles agents et simulation informatique : des changements dans la démarche explicative ?

Le développement de la simulation informatique représente un tournant dans la modélisation en sciences sociales. Les automates cellulaires (AC) et les systèmes multi-agents (SMA) notamment connaissent un succès croissants chez géographes, archéologues, économistes et sociologues depuis une dizaine d'années (Batty 2005, Kohler et Gumerman 2000, Epstein et Axtell 1996, Gilbert 1999). En géographie les attentes sont aussi importantes que celles ressenties envers les méthodes d'analyse de données dans les années 1970. La nature même de l'outil entraîne cependant un changement de perspective (figure 1). D'une approche centrée sur la mise en relation entre des objets et leurs attributs, mettant l'accent sur les interrelations entre les variables, l'approche agent met l'accent sur les *interactions*, interactions entre agents d'une part, entre agents et environnement d'autre part. Les SMA, domaine de l'informatique issu de l'intelligence artificielle distribuée (IAD), reposent sur une métaphore sociale : les agents sont situés dans un environnement, ils ont une représentation de cet environnement, ils peuvent agir sur celui-ci, ils interagissent entre eux et agissent en fonction de ces interactions. Cet outil, très centré sur les relations, ouvre de nouvelles voies à la modélisation, et un de ses attraits est justement de permettre une formalisation plus intuitive, moins mathématique, que les équations différentielles par exemple. Il est donc jugé plus accessible, plus riche, plus souple par nombreux chercheurs en sciences sociales que nombreux modèles mathématiques. On peut se demander s'il introduit d'autres formes de scientificité dans la discipline, et de façon générale, quels apports peuvent être attendus de modèles développés suivant cette approche.

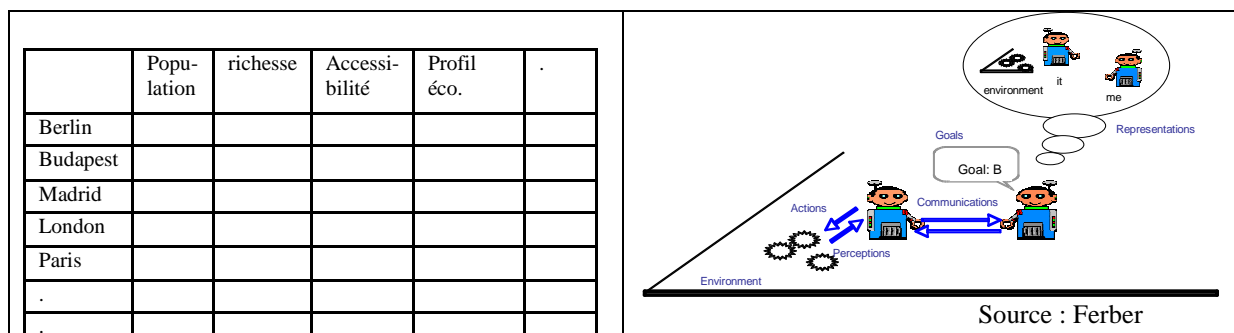


Figure 1 : De la matrice d'information spatiale (approche statistique) aux agents en interaction (approche multi-agents).

Certains chercheurs considèrent que « la simulation multi-agents introduit une rupture épistémologique en modélisation urbaine » (Benenson et Torrens, 2004). Parmi les arguments figurent une critique de l'approche agrégée, l'évitement du MAUP (cf paragraphe 3) et une défense de l'approche individuelle. Deux points méritent cependant d'être soulignés face à cette position. Le premier est que les agents sont des entités informatiques abstraites et sont donc susceptibles de représenter n'importe quel objet, et pas nécessairement un individu-humain, même s'ils sont tout à fait appropriés pour cela. Dans une problématique de halieutique, les bancs de poissons peuvent ainsi être formalisés par des « agents », tout comme les poissons et les pêcheurs. Dans un modèle de géographie urbaine, on pourra formaliser des entreprises ou même des villes par des agents informatiques. Le second point est que la modélisation au niveau individuel est loin d'être nouvelle en sciences sociales. Lors de ses travaux sur la diffusion des innovations en matière de techniques agricoles dans les années 1950, Hägerstrand mettait résolument l'individu au centre de son approche, stipulant qu'il était « indispensable de comprendre les pratiques quotidiennes des individus pour comprendre les configurations spatiales à d'autres niveaux géographiques ». Il développait ses

simulations en réalisant des tirages aléatoires à l'aide de jets de dés. Sa position était celle de l'individualisme méthodologique et il la justifiait. La même position sous-tend de nombreux modèles développés avec les SMA, mais elle semble davantage être une conséquence de la méthode adoptée que correspondre à un choix scientifique, et elle est de ce fait rarement explicitée.

La plupart des applications considèrent essentiellement deux niveaux d'observation et se concentrent sur les processus *bottom-up*, les interactions opérant entre les entités du niveau élémentaire faisant émerger des structures (l'exemple le plus classique étant celui de la ségrégation spatiale) à un niveau d'observation supérieur, avec l'hypothèse que les premières « causent » les secondes. L'approche agent offre cependant la possibilité, d'un point de vue méthodologique et technique, d'appréhender plus complètement l'articulation entre mécanismes *bottom-up* et *top down*, et d'explicitier la boucle de rétroaction qui lie les différents niveaux en jeu. Ainsi les structures spatiales qui émergent des interactions entre les individus influent à leur tour sur les comportements de ces individus (Portugali 2004). Cette boucle peut être inscrite dans un cadre multiscalaire plus large. Le niveau auquel on observe des structures spatiales peut effectivement aussi être divisé en entités spatiales qui interagissent (cette fois au travers d'échanges d'informations ou de flux migratoires tels qu'on les a évoqués au §2.2), provoquant à leur tour l'émergence de structures observables à un niveau encore supérieur (le type d'organisation hiérarchique d'un système de pôles urbains par exemple). Trois niveaux sont alors en jeu : 1- celui des individus ou des ménages ; 2- celui des territoires dans lesquels s'inscrivent les déplacements de ces individus, avec une formalisation des entités spatiales correspondantes (quartiers, pôles urbains, par exemple, ou encore les cellules d'une grille théorique) ; 3- le système spatial formé par l'ensemble des entités du niveau précédent.

De telles possibilités font des modèles-agents un outil privilégié pour formaliser des hypothèses mettant en jeu des processus opérant à des échelles différentes. Ils permettent en effet d'appréhender des phénomènes multiscalaires dont la compréhension nécessite de prendre en compte à la fois les interactions entre les entités relevant d'un même niveau, et celles entre entités relevant de niveaux différents. A côté de cet avantage méthodologique, il faut souligner l'intérêt conceptuel des SMA, notamment pour modéliser et réfléchir aux phénomènes d'émergence.

L'approche systémique a été adoptée de manière précoce en géographie mais les SMA permettent de formaliser les hypothèses correspondantes et de les tester. La simulation permet en effet d'expérimenter et contribue en ce sens à l'élaboration de l'explication des phénomènes étudiés. On peut ainsi tester les effets de différentes préférences d'agents-individus pour des environnements où leurs voisins leur sont ou non « similaires » sur la ségrégation spatiale. Shelling (1978) montre ainsi que l'on aboutit à une structure spatiale ségréguée même si les préférences individuelles sont très peu ségréguatives. Au niveau d'agents-villes on peut tester quels effets auraient l'existence de contraintes politiques en matière d'échanges sur le fonctionnement de réseaux de villes et sur la configuration des différenciations inter-urbaines. On peut ainsi comparer les différentes conséquences à long terme de l'existence ou non d'une barrière entre les blocs des pays de l'Europe de l'Est et de l'Ouest (Sanders, Mathian 2008). Dans chacun de ces cas la simulation agent permet d'explorer les liens qui existent entre différents niveaux et de discuter la valeur explicative des mécanismes qui ont été implémentés. Sawyer (2004), s'interrogeant sur la nature de l'explication et le rôle des modèles à propos de la simulation agents, défend l'idée qu'elle joue en sciences sociales un rôle de médiation entre théorie et données. Il insiste sur la

possibilité d'identifier « the underlying social mechanisms that realize the regularities captured by the law ».

L'approche agent en géographie permet de formaliser des relations dont on supposait déjà le rôle, mais que l'on pouvait difficilement tester avec les méthodes de modélisation dynamique du type équations différentielles. Elle permet notamment d'intégrer des interactions entre entités relevant de niveaux géographiques différents et d'appréhender plus directement la dimension multiscalaire des phénomènes étudiés, qu'ils soient naturels (Marceau) ou sociaux. Par ailleurs les possibilités d'expérimentation qu'elle offre permet d'affiner les explications proposées pour un phénomène donné. En revanche il semble que les formes de scientificité accompagnant cette démarche soient assez similaires à celles pratiquées avec d'autres méthodes au sein de la discipline. On peut d'ailleurs remarquer que les applications en économie par exemple n'utilisent pas les SMA de la même façon que les applications en géographie, les premiers mettant davantage l'accent sur des aspects analytiques, les seconds sur la possibilité de prendre en compte simultanément plusieurs niveaux géographiques. Dans les deux cas cependant l'accent est davantage mis sur les mécanismes d'émergence dans l'explication que lors de l'utilisation d'autres méthodes plus classiques.

Conclusion

Partant des pratiques, l'objectif a été de s'interroger sur les formes de scientificité qui ont cours en géographie, sur les éventuels changements/ruptures qu'a introduit l'adoption de nouvelles méthodes, et, bien que cet aspect ait été nettement moins développé, sur les différences qui seraient susceptibles d'exister suivant que l'objet d'étude est « physique » ou « humain ». En fait, sur ce dernier point, qu'il s'agisse d'objets relevant de la Nature ou de la Société ou d'un objet de recherche impliquant des interactions entre processus physiques et sociaux, les démarches et méthodes utilisées par les géographes sont similaires et connaissent des évolutions parallèles.

Sur la première question on peut constater d'abord que les nouvelles méthodes qu'une discipline adopte répondent le plus souvent à des attentes, à des constructions conceptuelles élaborées a priori mais n'ayant pu être modélisées et testées précédemment faute de méthodes appropriées ou de moyens informatiques suffisants (quand on simule les interactions entre des milliers, voire des millions d'entités élémentaires, il est indispensable de disposer d'énormes espaces mémoire). Par ailleurs, un bref regard comparatif sur les différentes pratiques des économistes et des géographes montre combien les mêmes méthodes sont intégrées suivant les logiques prévalant dans la discipline (il y a véritablement *transfert*), qu'il s'agisse de statistiques, du modèle gravitaire, ou plus récemment des modèles agents. Il est donc difficile de parler de rupture épistémologique même si l'introduction de nouveaux outils, de nouveaux concepts, de nouveaux moyens informatiques, permettent d'opérer des sauts en avant, de tester les idées existantes, et donc d'ouvrir la voie vers la formulation de nouvelles hypothèses explicatives et ainsi de faire avancer la connaissance du domaine.

Une image plus appropriée que la rupture est celle de C.P. Péguy (1990), évoquant l'évolution de la géographie suivant une « valse à trois temps ». Son analyse s'applique d'ailleurs aussi bien à la géographie physique que humaine, puisqu'il évoque à la fois la morphogenèse, la géobotanique et les monographies urbaines pour caractériser la démarche du géographe ayant consisté dans un premier temps à privilégier le diachronique au détriment du spatial, puis à privilégier le spatial (vision « horizontale ») en oubliant le dynamique, avant d'opter pour l'approche systémique qui lui a permis d'intégrer les deux dimensions. Les modèles agents offrent aujourd'hui la possibilité d'explicitier en plus les interactions entre niveaux d'observations différents et d'en expérimenter les effets sur la dynamique des systèmes

sociaux. On tourne dans la valse, mais chaque tour permet de progresser de quelques pas sur la piste (de la connaissance).

Bibliographie

- Arthur, W. B., 1994, *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press.
- Batty M., 2005, *Cities and Complexity; understanding cities with cellular automata, Agent-based models and fractals*, Cambridge: The MIT Press
- Benenson I., Torrens P.M., 2004, *Geosimulation; Automata-based modeling of urban phenomena*, Wiley.
- Benzecri J.P., 1973, *L'analyse des données, Tome 2 : l'analyse des correspondances*, Paris : Dunod.
- Brunet R. Ferras R., Thery H., 1992, *Les mots de la géographie*, Collection Dynamiques du territoire, RECLUS-La documentation Française, Paris.
- Charre J., 1995, *Statistique et territoire*, Collection espaces mode d'emploi, RECLUS, Montpellier.
- Christaller W., 1933, *Die zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die gesetz Massigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*, Jena, Fischer Verlag.
- Durand-Dastès F., 1984, « Systèmes et localisations; problèmes théoriques et formels », *Géopoint 84*, Avignon, 19-44.
- Durand-Dastès F., 1991, La géographie et les mémoires de Gaïa, in *Géopoint 1990*, p141-146.
- Durand-Dastès F., 1992, « Le particulier et le général en géographie », Actes du 6^e Colloque de Didactique de l'histoire et de la géographie, Institut National de Recherche Pédagogique : Paris, 209-219.
- Durantou, Rodriguez-Pose, 2005, *Environment and Planning, A*, volume 37, p. 1695-1705, editorial.
- Epstein J.M., Axtell R., 1996, *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up*, Cambridge, MA, MIT Press.
- Favory F., Mathian H., Raynaud C., Sanders L., 1998, « Sélection géographique, déterminisme et hasard », in Archaeomedes, *Des oppida aux métropoles*, Anthropos, coll. Villes, p151-248
- Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris.
- Fotheringham A.S., Charlton M.A., Brunson C., 2001, "Spatial Variations in School Performance: a Local Analysis Using Geographically Weighted Regression", *Geographical & Environmental Modelling*, 5 (1) , 43-66.
- Fotheringham A.S., Brunson C. Charlton M., 2000, *Quantitative Geography: Perspectives on Spatial Data Analysis* London, Sage.
- Gilbert N. Conte R. (eds.), 1995, *Artificial Societies : The Computer Simulation of Social Life*. UCL Press, London.
- Gilbert N., Troitzsch K.G., 1999, *Simulation for the Social Scientist*, Philadelphia: Open University Press
- Haag G., 1989, *Dynamic decision theory: applications to urban and regional topics*, Kluwer Acad. Pub.: Dordrecht, 256p.
- Hägerstrand T., 1953, *Innovation diffusion as a spatial process*, Chicago, University of Chicago Press.
- Hägerstrand T., 1970, " What about people in regional science? ", *Papers of the Regional Science Association*, 24, p.7-21.

- Helpman E. et Krugman P., 1985, *Market Structure and Foreign Trade*, Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Kohler T., Gumerman G. (ed.), 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies; agent-based modelling of social and spatial processes*, Oxford: University Press.
- Krugman P.R., 1991, Increasing returns and economic geography. *Journal of Political Economics*, 33(2), 483–499
- Longley P., Batty M., 1996, “Analysis, modelling, forecasting and GIS technology”, in Longley P., Batty M. (eds.), *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, Wiley, 1-15.
- Madelin M., Beltrando G., 2005. 'Spatial interpolation based mapping of spring frosts hazard in the Champagne vineyard', *Meteorological Applications - Special GIS*, no. 12, no. 12, 1, 51-56
- Marchionni C., 2004, Geographical economics versus economic geography: towards a clarification of the dispute, *Environment and Planning A*, 36 (10), 1737-1753.
- Martin R., 1999, “The new “geographical turn” in economics: some critical reflections”, *Cambridge Journal of Economics*, 23, 65-91
- Openshaw S. Taylor P.J., 1979, “A million or so correlates coefficients: Three experiments on the Modifiable Areal Unit Problem, in Wrigley N. and Bennet R.J., *Statistical Applications in the Spatial Sciences*, Pion: Londres.
- Olsen J., 2002, “On the units of geographical economics”, *Geoforum*, 33, 153-164
- Péguy C.P., 1990, « La géographie, une valse à trois temps », *Géopoint 1990*
- Amblard F., Phan D. (eds.), 2006, *Modélisation et simulation multi-agents; applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Paris, Hermes-Lavoisier, 446p.
- Portugali J., 2004, “Toward a cognitive approach to urban dynamics”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31 (4), 589-613.
- Pumain D., Robic M-C., 2002, « Le rôle des mathématiques dans une « révolution » théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970, *Revue d'Histoire des Sciences Humaines*, 1 (6), 123-144.
- Pumain D., Saint-Julien Th., 2001, *L'analyse spatiale 2. Les interactions spatiales*, Armand Colin, coll. Cursus.
- Reilly W.J., 1929, *Methods for the study of retail relationships*, University of Texas, Bulletin n°2944.
- Robic M-C., 1990, Les paradigmes successifs et les pratiques de la géographie, *Conférences sur la géographie, Grand Colloque de Prospective*, Ministère de la recherche et de la technologie.
- Sawyer R.K., 2004, “Social explanation and computational simulation”, *Philosophical Explorations*, Vol. 7, n°3.
- Sanders L., Mathian H., 2008, Expérimenter sur le futur des villes européennes avec un modèle multi-agents, 15e Journées de Rochebrune, *Rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels : Expérimentation et systèmes complexes*, ENST 2008 S 001, Paris (<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00258667v1>).
- Scott A., 2004, “A perspective of economic geography”, *Journal of Economic Geography*, 4, 479-499
- Schelling T.S., 1978, *Micromotives and Macrobehaviour*. New York, Norton and Co, 1978.
- Stouffer, S. A., 1940,. Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance. *American Sociological Review*, 5(6): 845–867.
- Spiekermann K., Wegener M., 2000, « Freedom from the Tyranny of Zones : Towards New GIS-based Spatial Models », in Fotheringham S., Wegener M. (dir.), *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*, GISDATA 7, Taylor and Francis, 45-61
- Stouffer, S. A., 1960, Intervening opportunities and competing migrants. *Journal of Regional Studies*, 2(1): 187–208.

- Thisse J.-F., 2007, in *L'Espace Géographique. Débat : Nouvelle économie géographique et géographie: quel dialogue?* *L'Espace Géographique*, 36(3), 193–214.
- Tobler, W. R., 1970. “A computer movie simulating urban growth in the Detroit region”, *Economic Geography*, 46, 234–40.
- Wilson A., 1970, *Entropy in urban and regional modelling*, Londres: Pion.