

De la singularité en géographie

Denise Pumain
pumain@parisgeo.cnrs.fr
halshs-01295546

Résumé :

En géographie, la singularité renvoie d'une part à l'idée d'une irréductible unicité de chaque lieu à la surface de la terre et d'autre part à la possibilité de concevoir cette unicité comme l'une des réalisations, parmi bien d'autres possibles, de trajectoires spatio-temporelles similaires nombreuses dans une évolution faite de dynamiques complexes qui incluent des bifurcations. Je voudrais montrer ici comment la construction de modèles de simulation reconstruisant l'évolution de systèmes géographiques permet de passer d'une conception à l'autre de la singularité, voire de dépasser leur apparente opposition. On me pardonnera peut-être de proposer pour cela le récit d'un cheminement singulier, à partir de la genèse de la série des modèles SIMPOP, parce que ce fut aussi et surtout une aventure collective dans une pratique permanente de collaborations pluri, inter et trans disciplinaires.

Introduction

En géographie, la singularité renvoie d'une part à l'idée d'une irréductible unicité de chaque lieu à la surface de la terre – « la beauté de ce qu'on ne verra jamais deux fois » disait le géographe Pierre Birot, dans un ouvrage sur le Portugal-, et d'autre part à la possibilité de concevoir cette unicité comme l'une des réalisations, parmi bien d'autres possibles, de trajectoires spatio-temporelles similaires nombreuses dans une évolution faite de dynamiques complexes qui incluent des bifurcations. L'image donnée de ces trajectoires dynamiques est celle de parcours abstraits rencontrant des « singularités », au sens mathématique qu'en donnait Poincaré dès 1881, soit des cols, fonds ou sommets dans un « système topographique » en courbes de niveau appelé depuis « paysage de Poincaré » et dont la succession irréversible constitue la signature pour l'identification de catégories génériques tout comme de cas particuliers (Prigogine, Stengers, 1979).

Je voudrais montrer ici comment la construction de modèles de simulation reconstruisant l'évolution de systèmes géographiques permet de passer d'une conception à l'autre de la singularité, voire de dépasser leur apparente opposition. On me pardonnera peut-être de proposer pour cela le récit d'un cheminement singulier, à partir de la genèse de la série des modèles SIMPOP, parce que ce fut aussi et surtout une aventure collective dans une pratique permanente de collaborations pluri, inter et trans disciplinaires.

La singularité comprise comme l'unicité des lieux

Les grandes catégories qui ont servi à classer les travaux de géographie dans les premières décennies d'existence de la discipline académique, depuis la fin du XIXe siècle, puis qui ont été longtemps reprises dans l'énoncé des cours universitaires, étaient « géographie générale » et « géographie régionale ». Tout comme dans d'autres disciplines des sciences humaines naissantes, la curiosité scientifique poussait à repérer des ressemblances et à questionner des déterminations repérables pour construire des explications générales, tout autant qu'à identifier des particularités locales et régionales (Robic et al., 2006). En effet, la curiosité

première de la géographie, d'abord nourrie par des récits de voyage et d'exploration, était orientée vers la différence, voire l'exotisme, qui devaient s'approfondir (s'alourdir ?) par la suite en monographies, lorsque l'exercice fut sanctionné par l'académie. Par exemple, dans la tradition des grandes thèses de géographie régionale, en France dans l'entre-deux guerres, il s'agissait de sélectionner un « terrain », que l'enquêteur pouvait (devait) parcourir, d'en justifier le choix par une identification rigoureuse de ce qui faisait sa discontinuité avec les régions environnantes (une première partie de la thèse était souvent consacrée à une minutieuse description des « limites ») et d'analyser l'originalité de sa configuration, son identité paysagère, territoriale, économique et culturelle.

Des concepts génériques importants comme ceux de genre de vie, de région ou de milieu ont pu être forgés sur ces prémisses plutôt monographiques. Cependant, la tendance à « l'exceptionnalisme » a fait l'objet de vives critiques dès les années 1950 aux Etats-Unis, notamment par Schaefer (1953) qui rappelait que « science is not so much interested in individual facts as in the patterns they exhibit » (p. 227). Schaefer situait dans l'historicisme le fondement de la croyance en l'unicité des objets de la géographie, qui pousserait comme en histoire à rejeter la recherche de « lois » et à prôner la « compréhension » plutôt que l'explication scientifique, en soutenant qu'une configuration régionale actuelle était l'aboutissement nécessaire de son histoire et que celle-ci suffisait à l'expliquer. Au contraire, Schaefer préconisait de rechercher des lois, notamment au moyen de comparaisons statistiques, pour expliquer les organisations spatiales, même si elles n'en apportent qu'une interprétation partielle et toujours révisable. Le mouvement amorcé par cette critique de la description monographique aux Etats-Unis, souvent dénommé « révolution théorique et quantitative » en géographie, et qui s'est propagé en France dans les années 1970, consiste donc aussi dans le rejet d'une épistémologie idiographique et le choix d'une posture nomothétique (Pumain et Robic, 2002). De très nombreux travaux conduisant à renforcer des théories et des modèles et à les appliquer dans toutes les régions du monde, en utilisant les méthodes de l'analyse spatiale et des systèmes d'information géographique sont issus de ce mouvement (Cuyala, 2014).

Après que diverses postures dites « post-modernes » aient tenté de réorienter la géographie depuis la fin des années 1990 vers la singularité, notamment via l'observation de l'expérience individuelle des lieux, du rapport de chacun à l'environnement (la « médiance » selon A. Berque, 1990), des médiatisations du rapport au monde nécessairement individualisées par la culture, l'engagement et la sensibilité (géographies du corps, des émotions...) de chacun mais aussi par les idiosyncrasies de l'imaginaire (Debarbieux, 2006), il peut être utile de revenir aux arguments énoncés par Schaefer, qui restent d'actualité, notamment lorsqu'il démontre la nécessaire complémentarité entre géographie générale (dite « systématique » en anglais) et la géographie régionale, autrement dit désormais entre la construction des modèles et l'identification des singularités, et cela à tous les niveaux, à toutes les échelles de l'investigation géographique.

La singularité dans les trajectoires temporelles des objets géographiques

En travaillant dans les années 1970 avec l'équipe dirigée par Philippe Pinchemel sur la croissance urbaine en France, j'avais été frappée de l'importance accordée aux acteurs du développement urbain dans beaucoup de discours explicatifs : l'action des maires, des constructeurs de logements, était souvent invoquée comme la clé de l'expansion des villes, alors que l'analyse statistique montrait la très grande généralité du processus. De même, Philippe Pinchemel qui déplorait la trop grande propension des recherches à la monographie

s'agaçait souvent lorsque était mise en avant la notion de « site favorable » pour expliquer une réussite urbaine, et s'ingéniait à énumérer tous les « sites favorables » vierges de tout établissement urbain...A la recherche d'explications moins idiographiques, nous avons pu démontrer l'intérêt de modèles statistiques simples, stochastiques, comme celui de Gibrat (1931) pour décrire en première approximation la forme de la distribution des taux de croissance dans un ensemble de villes (Pumain, 1980). Le principal intérêt d'un tel modèle était de proposer une explication dynamique de la forme de la distribution des tailles de villes, en montrant qu'elle était l'aboutissement d'un processus de croissance généralisé, assorti de fortes fluctuations spatiales et temporelles.

Cette piste conduisait à rechercher les explications de la dynamique des villes, non pas tant dans des conditions locales favorables à leur développement, ou dans la clairvoyance particulière de certains acteurs responsables, mais dans l'observation comparée de leurs transformations au cours du temps. Le travail entrepris avec Thérèse Saint-Julien sur les modifications intervenues dans la composition des emplois de toutes les villes françaises de plus de 20 000 habitants entre 1954 et 1975 démontrait ainsi, non pas la singularité de ces trajectoires, mais au contraire une étonnante similitude de l'évolution des profils socio-économiques, suggérant de fortes interdépendances entre les villes d'une même territoire, qui « font système » (Pumain, Saint-Julien, 1978). Plus encore, les modalités du changement observé dans ce système de villes ressemblent à celles que décrivent les théories physiques de l'auto-organisation, inférant un « ordre par fluctuations » qui maintient une configuration d'ensemble du système à partir des interactions entre ses composantes (Allen, Sanglier, 1979). La persistance ou la lente transformation de la structure du système (état macro-géographique du système des villes décrit par la forme de la distribution des tailles des villes, les principaux facteurs de différenciation des activités et des compositions sociales des villes...) s'accompagne de très fortes fluctuations dans la situation relative de ses éléments: au niveau méso-géographique, chaque ville passe rapidement entre des "états" de croissance, stagnation, décroissance démographique, ou des changements plus lents de son rang dans la hiérarchie des tailles sur la moyenne durée, ou bien encore les modifications décennales de son profil socio-économique, qui sont tantôt en avance, tantôt en phase ou en retard sur une transformation commune (Pumain, Saint-Julien, 1978). Si certaines de ces inflexions peuvent être interprétées comme des singularités ou des bifurcations « locales », c'est seulement lorsque le système devient instable, à la suite d'une perturbation interne (par exemple dans le cas des villes une nouvelle vague d'innovations socio-économiques) ou de l'amplification de fluctuations internes (par exemple une vitesse d'adaptation différenciée et persistante qui s'installe entre des groupes de villes) que des bifurcations peuvent naître à l'échelon du système des villes.

Le plus souvent, la plupart des fluctuations des trajectoires individuelles des villes sont sans effet sur la structure d'ensemble du système, que nous caractérisions à l'époque par les principales composantes mises en évidence par des analyses factorielles et regroupant de nombreux descripteurs des villes corrélés entre eux. Nous avons pu proposer une interprétation de ces composantes, en les reliant au processus de diffusion des innovations socio-économiques qui affectent peu ou prou toutes les villes mais qui laissent des traces sous forme de spécialisations, plus ou moins durables, et plus ou moins liées à la taille des villes, selon la nature plus ou moins sélective et l'ampleur des vagues d'innovation. Ainsi, nous avons une première composante de la différenciation socio-économique des villes, traduisant leur « image de marque » dans la seconde moitié du XXe siècle, qui reflétait une inversion de l'attractivité de nombreuses villes depuis le XIXe siècle, les villes ouvrières qui concentraient les industries au nord et à l'est du territoire étant devenues les plus pauvres et les moins attractives tandis que les villes en croissance étaient celles des régions méridionales qu'avait délaissées la première révolution industrielle. Et nous avons pu

mettre en évidence l'émergence, par amplification progressive de petites fluctuations, d'une autre composante, significative des sélections opérées entre les villes par les innovations de la période des Trente glorieuses, que nous avons appelée « modernité technique », suscitant de plus fortes croissances dans les principales métropoles et dans les villes de la région Rhône-Alpes les plus dynamiques, ou s'associaient industries et tertiaire innovant, par opposition à des villes de l'intérieur en perte de vitesse. Cette « bifurcation » dont la durée s'est étalée sur quelques décennies a soutenu un processus de métropolisation et engendré une auto-corrélation temporelle assez exceptionnelle, liée à la taille des villes et à leur localisation, dans les taux de croissance des villes françaises, manifestant une singularité dans une dynamique générale de « co-évolution » (Paulus, 2004).

Les infléchissements des trajectoires de certaines villes qui se différencient des autres, par une croissance plus rapide à un moment donné ou par une forme de spécialisation dans certaines activités sont ainsi rendues intelligibles, mais les « singularités » qui produisent ces évolutions particulières sont alors entendues comme résultant de dynamiques communes à l'ensemble des villes, dans une théorie urbaine qui n'est plus une théorie structuraliste mais devient une théorie évolutive (Pumain, 1997).

Auto-organisation, bifurcation et singularité

Ainsi, la notion d'auto-organisation, transposée aux systèmes de villes, suggère que, pour expliquer leur structuration selon une architecture identifiable parce que persistante, il n'y a pas une finalité politique ou économique explicite, qu'il serait possible de décrire en termes institutionnels, ou d'interpréter selon une fonction à optimiser, mais que la structure est le produit involontaire d'interactions multiples entre des acteurs très nombreux. Chacun agit selon ses finalités et ses stratégies propres, mais il n'est pas nécessaire de connaître en détail chacune de ces stratégies pour prédire (ou simuler) l'architecture générale du système. La dynamique du changement contribue à engendrer la mise en forme du système, sous l'action de processus dynamiques, internes et externes. Si une structure émerge, et se maintient de façon suffisamment persistante pour être reconnaissable, elle n'en est pas moins le produit de cette évolution. Dans cette optique, les changements momentanés de trajectoire d'une ville en particulier peuvent être interprétés comme des « bifurcations » locales, dont la succession produit l'originalité de la trajectoire de chaque ville, et ce sont les corrélations de plus longue portée, spatiale et temporelle, entre ces trajectoires, qui définissent les « bifurcations » de la structure des systèmes de villes pouvant conférer à chaque système une configuration particulière. Ainsi, la primauté parisienne dans le système des villes françaises, qui perdure depuis l'organisation très précoce et durable d'un territoire très centralisé dans cette partie de l'Europe, constitue une singularité qui distingue la France par un écart de dimension rarement observé dans des systèmes de villes de pays développés. Pour autant, le système des villes françaises n'échappe pas à la dynamique « banale », générique, qui construit les interdépendances d'évolution entre les villes d'un même système à partir de leurs interactions et qui se traduit par une adaptation progressive, à coup de changement incrémental de leur société et de leurs activités.

Pour comprendre la compatibilité de ces fluctuations "désordonnées", aléatoires" (cela ne veut pas dire que ces actions soient irrationnelles ou inexplicables, mais qu'elles sont impossibles à décrire en détail, pour chaque élément simultanément, dans la totalité du système défini au niveau d'observation supérieur) avec la persistance de la structure du système, pour concilier la dynamique rapide du niveau micro et la dynamique lente du niveau macro, les théories de l'auto-organisation proposent des modèles mathématiques que nous avons expérimentés (Pumain, Sanders, 2013). Ces modèles représentent par des équations différentielles non linéaires l'évolution temporelle des

variables d'état qui définissent la structure macroscopique du système, les interactions microscopiques étant figurées par des fonctions mathématiques ou par des paramètres. L'intérêt de ces modèles est de déplacer la perspective habituelle dans l'étude des transformations des objets géographiques.

« Dans les applications de modèles dynamiques qui ont été faites, aux régions (Allen, Sanglier, 1979, Weidlich, Haag, 1988), ou aux villes (Pumain et al., 1989, Lepetit, Pumain, 1993, Sanders, 1992), histoire et géographie changent leurs relations. La géographie n'est plus le théâtre des opérations sur lequel l'histoire inscrirait ses événements. L'histoire n'est plus l'explication ultime d'une identité locale, entendue comme la reconstitution de l'itinéraire temporel irréversible qui conduit nécessairement à l'objet géographique observé aujourd'hui, dans son irréductible unicité. Les deux disciplines s'éclairent réciproquement en s'intéressant à la morphogenèse des structures socio-spatiales, aux processus qui font advenir et devenir l'espace géographique[...]. Dans cette optique, on perd les notions d'unicité et de non-reproductibilité attachées aux objets historiques, mais on prend en compte l'irréversibilité de leur trajectoire particulière. On admet que les processus soient formalisables, que les objets géographiques puissent avoir une « dynamique banale » dans une tendance historique qui demeure irréversible » (Pumain, 1998, p.64).

Les modèles de simulation pour reconstruire les singularités

En dépit de l'intérêt heuristique des théories de l'auto-organisation et des modèles mathématiques qui y sont associés, l'application pratique de tels modèles en géographie se révèle difficile (Pumain et al., 1989, Sanders, 1992), en particulier du fait du manque de flexibilité des systèmes d'équations non linéaires pour représenter des interactions spatiales. Nous avons donc assez vite recouru à des modèles de simulation multi-agents qui autorisent une reconstruction explicite de ces interactions, lesquelles sont supposées engendrer par leurs opérations répétées les dynamiques différenciées qui caractérisent les systèmes de villes. Nous avons ainsi conçu avec l'aide d'informaticiens la série des modèles SIMPOP, destinés avant tout à tester les propositions théoriques d'une théorie évolutive des villes (Pumain, 1997) énoncée pour rendre compte des observations empiriques accumulées à la suite du traitement statistique de grandes bases de données comparatives sur différents systèmes de villes.

Le premier des modèles SIMPOP (Bura et al., 1996, Sanders et al., 1997) nous a permis de considérer comme nécessaire une hypothèse d'interactions entre les villes pour engendrer leur co-évolution : sans échanges entre les villes, la hiérarchisation du système selon la très caractéristique « loi rang-taille » ne se produit pas. A l'époque, avec quelques centaines de simulations effectuées « à la main » par essais et erreurs sur les valeurs des paramètres non directement observables, nous n'étions cependant pas en mesure de prouver que cette condition nécessaire était aussi suffisante.

Une deuxième version d'un modèle SIMPOP, construite par un autre informaticien, Benoît Glisse, nous a permis de renseigner quelques uns des processus générateurs de la diversité des systèmes de villes, à partir d'une comparaison entre l'Europe et les Etats-Unis (Bretagnolle et al., 2010). Une première version du modèle, ajustée sur l'évolution des villes européennes pendant quatre siècles, dut subir des modifications qualitatives importantes pour parvenir à rendre compte de l'évolution des villes américaines pendant quelque trois siècles : la singularité d'un système de villes de « pays neuf » fut ainsi mise en évidence, ou du moins confirmée dans ses grandes lignes, à partir de la nécessaire transformation des règles du

modèle multi-agents représentant les interactions entre les villes, en obligeant en particulier à introduire la notion de « front pionnier » dans la colonisation d'un territoire et la dépendance à l'égard d'une demande extérieure –celle de la métropole- pour assurer le développement du système conformément à la dynamique révélée par le calibrage sur les données empiriques. En quelque sorte, un modèle dynamique de système complexe nous a ainsi permis de retrouver une expression d'une « singularité » au sens classique de cette expression en géographie, liée à la géohistoire du système urbain.

A l'échelon, non plus du système de villes, mais de la ville, le travail de Thomas Louail (2010) a l'intérêt de démontrer la possibilité de simuler l'émergence de structures spatiales urbaines singulières, en dépit de processus dynamiques contraignants similaires, au prix de la spécification de quelques règles et conditions initiales pour différencier les morphologies des villes européennes et des villes américaines, les premières au plan radio-concentrique et caractérisées par de fortes différences internes de densités et de prix (selon des gradients centre-périphérie) et les secondes plus homogènes et beaucoup plus étalées, selon des plans orthogonaux qui réduisent les différentiels d'accessibilité. On retrouve ici l'illustration d'une « bifurcation » au sens de l'existence de trajectoires distinctes alternatives, compatibles avec un même processus dynamique.

Mais c'est une collaboration beaucoup plus étroite et suivie entre informaticiens et géographes qui devait permettre de franchir une étape qualitativement très importante dans l'identification de ce qui constitue la spécificité d'un système de villes, par delà la généricité des processus dynamiques implémentés dans des modèles conçus pour être aussi parcimonieux que possible. En effet, un problème majeur des simulations multi-agents reste celui de leur validation, faute de pouvoir garantir facilement l'unicité des solutions atteintes lors de leur calibrage, que ce soit sur des données empiriques ou des hypothèses théoriques (Banos, 2013).

En suivant le développement de la plateforme de simulation OpenMOLE, qui permet d'intégrer des processus de validation sophistiqués des modèles, incluant des algorithmes génétiques et une grande capacité de calcul parallélisé sur grille, nous avons pu acquérir davantage de certitude dans la qualité de l'estimation des paramètres d'un modèle générique (SimpopLocal, préparé dans le cadre de la thèse de Clara Schmitt (2014) avec le concours de la plateforme SimProcess mise au point par Sébastien Rey-Coyrehourcq (2015)). L'exploration quasi intégrale de l'espace des paramètres ayant requis quelque 500 millions de réplifications du même modèle (Schmitt et al., 2015), les hypothèses théoriques ainsi testées et supposées conduire à l'émergence d'un système de villes à partir des interactions propageant des innovations entre des centres de peuplement ont pu être considérées comme non seulement suffisantes, mais aussi nécessaires pour reconstruire une hiérarchie urbaine. Une nouvelle procédure pour l'exploration rigoureuse de l'espace des comportements d'un modèle a été mise au point, qui complète notre capacité à distinguer dynamiquement le particulier et le général (Reuillon et al., 2015). Plus encore, un calibrage d'un modèle plus complexe sur le cas relativement singulier du système des villes de l'espace post-soviétique (Cottineau, 2014) a conduit à proposer une méthode incrémentale de construction de tels modèles, sur la base d'une parcimonie décroissante dans la prise en considération des mécanismes générateurs du système et des contraintes environnementales qui le spécifient. Une appréhension nouvelle de la singularité géographique est ainsi proposée, qui l'identifie à différents niveaux de précision, selon une focale ajustable évaluant le degré de spécificité d'une évolution particulière dans un dynamique générique, pour une granularité donnée de la description (Cottineau et al., 2015).

Conclusion

Nous avons opéré un renversement dans un point de vue « sédimentaire » sur la géographie qui la concevait comme « la dernière couche de l'histoire ». Il ne s'agit plus de rechercher l'explication d'une localisation, d'un « être géographique », en prenant en compte toute son histoire, en reconstituant sa genèse dans ce qu'elle a d'unique. Il ne s'agit plus de faire l'histoire comme le chemin qu'on parcourt à reculons pour trouver une « explication » dans le récit de la biographie d'un lieu. D'abord grâce à des modèles qui admettent l'existence de solutions multiples à un même processus dynamique, nous avons pu faire l'hypothèse que les objets géographiques, dans certains aspects au moins, représentent des réalisations particulières, parmi un univers de réalisations possibles, de processus dynamiques généraux. Nous avons pu ensuite, par des modèles de simulation multi-agents, représenter des hypothèses théoriques sur les formes d'interaction entre les villes, difficilement observables sur le moyen et long terme, mais cohérentes avec les observations empiriques disponibles sur les changements intervenus dans des systèmes de villes de types différents (Pumain et al., 2015). Entreprise dans un programme dont le nom met délibérément en avant la géodiversité urbaine¹, la construction de modèles constamment enrichis par des apports de données empiriques et des innovations méthodologiques participe bien de l'identification des singularités géographiques, au sens « classique » du terme, et à différentes échelles de l'espace et du temps.

Références

- Allen P. Sanglier M. 1979, A dynamic model of growth in a central place system, *Geographical Analysis*, 256-272.
- Banos A. 2013: *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et en SHS*. Université Paris I, HDR, Hal-shs tel-01112668.
- Berque Augustin (1990). *Médiance; de milieu en paysage*. Paris, Belin, collection « Mappemonde », 164 p.
- Bretagnolle A., Pumain D. 2010, Simulating urban networks through multiscalar space-time dynamics (Europe and United States, 17th -20th centuries), *Urban Studies*, 47, 13, 2819-2839.
- Bura S. Guérin-Pace F. Mathian H. Pumain D. Sanders L. 1996, Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 2, 161-178.
- Cottineau C., 2014, *L'évolution des villes dans l'espace post-soviétique. Observation et modélisations*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, thèse de Doctorat.
- Cottineau C., Chapron P., Reuillon R., 2015, "Growing models from the bottom up. An evaluation-based incremental modelling method (EBIMM) applied to the simulation of systems of cities", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 18, No. 4, 9. DOI : 10.18564/jasss.2828.

¹ L'ERC advanced grant « GeoDiverCity » a soutenu le développement de ces recherches.

Cuyala S. 2014, *Analyse spatio-temporelle d'un mouvement scientifique. L'exemple de la géographie théorique et quantitative européenne francophone*. Université Paris I Panthéon-Sorbonne, thèse de doctorat.

Debarbieux B. 2006. « Prendre position: réflexion sur les ressources et les limites de la notion d'identité en géographie ». *L'Espace géographique*, t. 35, n°4, p. 340-354.

Gibrat R. 1931, *Les inégalités économiques*. Paris, Sirey.

Lepetit B. Pumain D.(dir) 1993, *Temporalités urbaines*. Paris, Anthropos.

Louail T., 2010, *Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents – Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale*. Université d'Evry, thèse de doctorat en informatique.

Paulus F. 2004, *Coévolution dans les systèmes de villes : croissance et spécialisation des aires urbaines françaises de 1950 à 2000*. Université Paris 1-Panthéon Sorbonne, thèse de doctorat.

Prigogine I. Stengers I. 1979, *La nouvelle alliance*. Paris, Gallimard.

Pumain D. 1980, *Contribution à l'étude de la croissance urbaine dans le système urbain français*. Université de Paris I, thèse de doctorat es-Lettres et Sciences Humaines, 492 p.

Pumain D. 1997, Vers une théorie évolutive des villes. *L'Espace Géographique*, 2, 119-134.

Pumain D. 1998, La géographie saurait-elle inventer le futur ? *Revue européenne des sciences sociales*, 110, 53-69.

Pumain D. 2001, Villes, agents et acteurs en géographie. *Revue européenne des sciences sociales*, 121, 81-93.

Pumain D. 2012, Multi-agents System Modelling for Urban Systems : the Series of SIMPOP models, in Heppenstall A. J., Crooks A.T., See L.M., Batty M. (eds), *Agent-based Models of Geographical Systems*. Springer, Population Studies, 721-738.

Pumain D. Saint-Julien T., 1978, *Les dimensions du changement urbain*. Paris, CNRS, 202 p.

Pumain D. Sanders L. Saint-Julien T. 1989, *Villes et auto-organisation*. Paris, Economica.

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*, 6, 123-144.

Pumain D., Sanders L., Bretagnolle A., Glisse B., Mathian H., 2009, The Future of Urban Systems, in : D. Lane, D. Pumain, S. Van der Leeuw, G. West (eds.), *Complexity perspectives on innovation and social change*, ISCOM, Springer, Methodos Series, Berlin, 331-359.

Pumain D., Swerts E., Cottineau C. Vacchiani-Marcuzzo C., Ignazzi A., Bretagnolle A., Delisle F., Cura R., Lizzi L, Baffi S. 2015 : Multi-level comparison of large urban systems. *Cybergeo*, 706, <http://cybergeo.revues.org/26730> ; DOI : 10.4000/cybergeo.26730.

Rey-Coyrehourq S., 2015, *Une plateforme intégrée pour la construction et l'évaluation de modèles multi-agents en géographie*. Université Paris I, thèse de doctorat.

Reuillon R. Schmitt C., De Aldama, R. Mouret J.-B., 2015, A new method to evaluate simulation models: The Calibration Profile (CP) algorithm. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, SimSoc Consortium, 2015, 18 (1).

Robic M.-C., Gosme C., Mendibil D., Orain O., Tissier J.-L., 2006, *Couvrir le monde, Un grand XXe siècle de Géographie française*. Paris, Ministère des Affaires étrangères, APDF.

Sanders L. 1992, *Systèmes de villes et synergétique*. Paris, Anthropos.

Sanders L. Pumain D. Mathian H. Guérin-Pace F. Bura S. 1997, SIMPOP: a multi-agent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B*, 24, 287-305.

Sanders L., Favaro JM., Glisse B., Mathian H., Pumain D. 2007, Artificial intelligence and collective agents :the EUROSIM model, *Cybergeo*, 392, 15 p.

Schaefer F.K., 1953, Exceptionalism in geography. A methodological examination. *Annals of the Association of American Geographers*, 43, 3, 226-249.

Schmitt C., 2014, *Modélisation d la dynamique des systèmes de peuplement : de SimpopLocal à SimpopNet*. Université Paris I, thèse de doctorat.

Schmitt C., Rey-Coyrehourcq S., Reuillon R., Pumain D., 2015, Half a billion simulations, Evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the SimpopLocal geographical model, *Environment and Planning B*, 42, 2,300-315.

Weidlich W., Haag G. (eds.) 1988: *Interregional migrations. Dynamic theory and comparative analysis*, Berlin, Springer Verlag.