



HAL
open science

La sous-détermination des modèles explicatifs par les lois empiriques : un problème récurrent mais fécond en géographie de modélisation

Franck Varenne

► To cite this version:

Franck Varenne. La sous-détermination des modèles explicatifs par les lois empiriques : un problème récurrent mais fécond en géographie de modélisation. Claude Blanckaert, Jacqueline Léon, Didier Samain. Modélisations et sciences humaines – Figurer, interpréter, simuler, L'Harmattan, p. 85-101, 2016, 978-2-343-09294-2. <hal-02911721>

HAL Id: hal-02911721

<https://hal.science/hal-02911721v1>

Submitted on 4 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

LA SOUS-DETERMINATION DES MODELES EXPLICATIFS PAR LES LOIS EMPIRIQUES : UN PROBLEME RECURRENT MAIS FECOND EN GEOGRAPHIE DE MODELISATION¹

Franck VARENNE

INTRODUCTION

Les travaux d'histoire et d'épistémologie de la géographie² montrent que plusieurs facteurs ont contribué à l'émergence de la géographie théorique et de modélisation dans les années 1950 et 1960 : les changements de nature des objets étudiés (villes, commerces, transports, diffusion de l'innovation), la perception de la géographie comme science des interactions spatiales, l'analogie avec l'écologie quantitative alors en plein essor, l'influence de la première économie spatiale, la diffusion des techniques d'analyse de données, l'apparition de l'ordinateur, l'influence du positivisme logique, les conflits de génération dans le milieu académique.

Le premier objectif de notre article est de confirmer l'importance d'un autre facteur en commençant par une brève analyse de la trajectoire intellectuelle d'un des premiers représentants de la géographie de modélisation, le géomorphologue Richard John Chorley (1927-2002). Cet autre facteur est précisément l'exemple précoce donné à la géographie humaine par la géomorphologie en matière de capacité à concevoir des modèles explicatifs de morphologies. Nous verrons au nom de quels arguments épistémologiques Chorley pense pouvoir transposer cette méthode à la loi rang/taille en géographie humaine des villes. Nous montrerons qu'assez vite, cependant, plusieurs modèles théoriques se révèlent candidats. Il y a plus grave : les phénomènes géomorphologiques eux-mêmes - dont l'explication devait être prise comme exemple - se révèlent finalement engendrables par des processus quelconques, non nécessairement associés à des lois physico-chimiques déterminées.

Le second objectif de notre article est de rendre compte d'une récurrence de cette sous-détermination et de cet apparent obstacle à la constitution de véritables modèles théorico-explicatifs en géographie. Nous poserons la question de savoir si une bonne manière de faire justice aux véritables apports de la géographie de modélisation, dans les dernières décennies, ne pourrait pas consister dans un déplacement de notre attente épistémologique à son égard et notamment, dans une attention à l'inventivité propre dont elle a périodiquement témoigné pour affronter cette sous-détermination de manière à la fois méthodologiquement innovante et conceptuellement féconde.

1. DES MORPHOLOGIES AUX PROCESSUS

1.1. Modèles de processus en géomorphologie : Horton, Strahler

En 1945, Robert E. Horton (1875-1945), hydrologue auprès de l'Université Cornell, renouvelle complètement la perspective de la géomorphologie alors dominante aux Etats-Unis, essentiellement celle instituée par William M. Davis (1850-1934). Dans (Horton, 1945), il met en évidence deux lois³ empiriques et morphologiques pour les arbres fluviaux : la première stipule que pour un arbre fluvial donné, il existe un rapport moyen constant - dit *rapport de bifurcation* - d'environ 3,5 entre le nombre

¹ Ce travail a bénéficié de plusieurs entretiens et interactions avec Denise Pumain, Lena Sanders, Arnaud Banos, Sébastien Rey, Clara Schmitt, Romain Reuillon, Clémentine Cottineau, et Paul Chapron, notamment dans le cadre de l'ANR TRANSMONDYN (L. Sanders dir.). Qu'ils en soient tous remerciés ainsi que le relecteur de la première version de ce texte. Les idées exposées ici n'engagent évidemment que l'auteur.

² (Burton, 1963), (Ackerman, 1963), (Chorley & Haggett, 1967), (Harvey, 2011 [1969]), (King, 1979), (Claval, 1982), (Billinge *et al.*, 1984), (Johnston, 1997), (Staszak, 2001), (Pumain & Robic, 2002), (Orain, 2009), (Scheibling, 2011).

³ Une loi empirique est l'énoncé d'une relation fonctionnelle constante entre les variables d'un même système.

de branches qui se situent à un ordre de ramification⁴ donné et le nombre de branches se situant à l'ordre suivant. La seconde loi empirique stipule que « les longueurs moyennes des cours d'eau de chacun des différents ordres dans un bassin de drainage tendent à s'approcher étroitement d'une série géométrique directe dans laquelle le premier terme est la longueur moyenne des cours d'eau de premier ordre » (Horton, 1945 : 291).

Selon Arthur N. Strahler (1918-2002) de l'université de Columbia, l'approche de Horton est supérieure à celle de Davies parce qu'elle modélise de manière également explicative la dynamique des formes du paysage et ne se contente pas de les décrire (Strahler, 1950 ; Strahler, 1952). L'existence de lois empiriques est la preuve qu'un bassin de drainage se comporte comme un *système thermodynamique ouvert en état stationnaire*. Pourtant, cette assimilation est discutable, les modèles de processus de Horton relevant surtout de la mécanique des matériaux⁵. Contrairement à la mécanique statistique, elle ne trouve pas immédiatement à se traduire dans les variables de la thermodynamique car l'approche des phénomènes n'y est ni populationnelle ni statistique. À l'époque, cependant, peu de géomorphologues ont conscience de ce raccourci argumentatif.

1.2. Modèles de processus et théorie des systèmes

L'approche par la théorie des systèmes va servir à recouvrir ce flottement théorique comme cette assimilation rapide de la dynamique des bassins de drainage à une thermodynamique. Chorley jouera ici un rôle décisif. Initialement formé en géomorphologie à Oxford, il termine son cursus à Columbia, auprès de Strahler, avant de poursuivre sa carrière à Cambridge (UK). Dans ses articles, Chorley soutient qu'il faut travailler à concilier ce que les deux points de vue divergents ont de vrai : l'approche historique de Davis et l'approche anhistorique de Horton et Strahler⁶. En approfondissant les concepts de la théorie des systèmes au contact direct de Bertalanffy, Chorley se persuade qu'on peut marier ces deux approches : il suffit de considérer qu'un paysage est un système ouvert dont certains attributs non décisifs pour la forme globale se dégradent continuellement tandis que les attributs décisifs (longueurs des branches fluviales, aires desservies) se dégradent par sauts, ce qui permet la reconnaissance d'états stationnaires morphologiquement distincts (Chorley, 1962 : p. B5). L'erreur de Davies a été de supposer que toutes les propriétés se dégradent continuellement : la stationnarité de certaines formes était rendue impensable. À l'appui de son argumentation analogique, Chorley invoque le travail de Prigogine sur les équilibres dynamiques en cinétique chimique.

Les travaux ultérieurs de Chorley vont tâcher d'étendre cette approche par les systèmes. Chorley et Kennedy (1971) distingueront notamment les *systèmes à contrôle (control systems)* qui sont les systèmes les plus intégrés et les plus sophistiqués : ce sont des systèmes de type processus-réponse dans lesquels certains composants (niveaux de seuil, valves d'entrée-sortie) sont modifiables de l'extérieur et conservent ainsi au système des degrés de liberté. On peut alors imaginer que ces systèmes soient par là en partie contrôlés par une intelligence guidée par des buts. Or, cette intelligence peut typiquement être instanciée par un corps social. C'est avec ce concept élaboré de *système de contrôle* que Chorley introduit ce qu'il pense être un point de jonction décisif entre géographie physique et géographie humaine. Plus exactement, il s'agit de ce que nous pouvons appeler un *horizon d'homogénéisation* : la jonction s'y fait à la faveur d'une homogénéisation des éléments supposés clés pour les systèmes en questions, à savoir ici la matière, l'énergie et l'information. En 1969, en se fondant sur un principe similaire mais encore imprécis, Chorley avait déjà proposé d'homogénéiser les techniques d'analyse de réseaux (routiers, ferroviaires) en géographie humaine avec les analyses de réseaux fluviaux (Haggett & Chorley, 1969)⁷.

Il faut comprendre que l'épistémologie appliquée de Chorley va plus loin que celle formulée par le pourtant retentissant article de Fred Schaefer (1953). Pour Schaefer - qui suivait en cela l'épistémologie du positivisme logique sur les conseils de son collègue direct Gustav Bergmann⁸ -, la géographie, tant humaine que physique ne devait plus se priver de rechercher d'authentiques lois. Mais

⁴ Pour comprendre grossièrement cette notion d'ordre, retenons que le ruisseau des montagnes est d'ordre 1, celui dans lequel il se jette est d'ordre 2, etc.

⁵ (Von Elverfeldt, 2012 : 70-77).

⁶ Voir (Chorley, 1957) et (Chorley, 1964).

⁷ Pour une brève histoire de l'approche systémique en géomorphologie, voir (Huggett, 2007).

⁸ C'est Bergmann qui mettra la dernière main à ce fameux article posthume de Schaefer.

il reculait devant les conséquences ultimes de son manifeste positiviste : alors qu'il lui reconnaissait la possibilité de formuler des *lois morphologiques* dites encore *lois de section* par (Bergmann, 1957)⁹ – comme par exemple, en géographie humaine, les lois de Christaller (1968 [1933]1933) sur la localisation relative des villes ou, en géographie physique, les lois de Horton – il contestait à la géographie la possibilité de formuler d'authentiques lois de processus. Les lois de ce type, à savoir les lois dynamiques d'apparition de patterns ou de structures de localisation ou d'implantation en géographie humaine, ne sont pas des lois géographiques à proprement parler car elles doivent mobiliser des savoirs anthropologiques, économiques et d'autres dimensions encore de la vie humaine qui relèvent d'autres sciences que de la seule géographie. Pour Schaefer (1953 : 247-248), dans de telles lois de processus, aucune catégorie de variables ne peut être auto-suffisante : ni les seules variables spatiales, géométriques, ni les seules variables économique ou anthropologiques. La prudence de Schaefer n'a pas été partagée, par la suite, par Chorley. Pour ce dernier, on peut et on doit imaginer que des lois de processus typiquement géographiques président à l'instauration de lois empiriques de types morphologiques, aussi bien donc en géographie physique qu'en géographie humaine que dans le mixte des deux. L'espoir de Chorley est de mettre ainsi au jour les processus présidant aux phénomènes géographiques en général. Dans la section qui suit, nous allons pourtant montrer que la mise au jour de tels processus est directement menacée par des phénomènes de sous-détermination. De quoi s'agit-il au juste ?

2. LA SOUS-DETERMINATION AFFECTE LA GEOGRAPHIE PHYSIQUE COMME LA GEOGRAPHIE HUMAINE

2.1. Sous-déterminations Théories/Faits, Lois/Données et Processus/Loi

La thèse dite de la « sous-détermination »¹⁰ est celle selon laquelle les données expérimentales ne sont jamais susceptibles de servir à la détermination univoque d'une théorie rendant compte de ces données, qu'elles ne peuvent donc jamais servir univoquement ni à la fonder, ni à la vérifier, ni à la corroborer¹¹. Quine s'en persuade par des analyses conceptuelles plutôt que par l'histoire des sciences. Nous n'évoquerons pas ici ses arguments philosophiques. Nous la nommerons *sous-détermination T/F philosophique*, T/F pour Théories/Fait.

Elle est à distinguer d'une *sous-détermination T/F mathématique*. Par exemple : on démontre qu'un nombre infini de polynômes de degré suffisamment grand est ajustable à une séquence donnée quelconque de nombres¹². Par ailleurs, même si l'argument de Quine n'est pas une preuve suffisante, les scientifiques sont empiriquement confrontés à une sous-détermination apparentée : la *sous-détermination Loi/Données empirique*. Du fait de l'insuffisante qualité des données¹³, il n'est pas toujours possible de trouver le meilleur *type de lois* de distribution empirique pour représenter la loi rang/taille¹⁴. Selon la géographe Denise Pumain, cette sous-détermination doit inciter à s'enquérir non pas tant du meilleur ajustement que de la nature des processus menant à ces lois empiriques¹⁵.

Et c'est là qu'intervient une autre forme de sous-détermination : la *sous-détermination P/L – P/L* pour Processus/loi. Elle est encore d'une autre nature bien que certains aient pu y voir une identité entre cette sous-détermination et celle de Quine, voire comme un moyen de la confirmer techniquement, c'est-à-dire avec des considérations mathématiques¹⁶. Elle qualifie le rapport multivoque qui peut exister entre plusieurs modèles théoriques de processus et une loi empirique que

⁹ *I.e.* valant sur une tranche temporelle. Voir notre analyse de l'influence de Bergmann sur les géographes anglo-saxons dans (Varenne, à paraître), chap. 1, sect. 1.2.

¹⁰ Nous simplifions ici faute de place. Il y a en fait de nombreuses thèses de la sous-détermination et, dans le détail, celle de Quine peut être diversement interprétée. Voir (Stanford, 2013).

¹¹ (Quine, 2003 [1953] : 76-77).

¹² Dans ce cas, pourtant, on peut déterminer une loi *pratiquement* optimale, *i.e.* de degré moindre.

¹³ Robson (1973 : 26), (Pumain, 1982 : 36).

¹⁴ Loi que nous expliciterons plus bas.

¹⁵ (Pumain, 1982 : 36).

¹⁶ Voir par exemple (Atlan, 1990).

ces modèles visent à expliquer. À la différence de la sous-détermination Lois/Données, la partie empirique d'une sous-détermination P/L ne consiste pas en une collection de faits ou de mesures. Car elle est déjà structurée sous forme d'une *loi*, une *loi empirique morphologique* en géographie. Dans ce cas de sous-détermination, le problème souligné ne vient pas de l'information subreptice des faits par une théorie. Il vient d'un rapport espéré univoque mais qui se révèle malencontreusement multivoque entre l'expression d'une régularité et l'expression d'une autre régularité, expressions formulées soit dans un même formalisme soit dans deux formalismes différents, et cela dans le cadre de la recherche d'une *fonction explicative* qui serait assurée *par l'une pour l'autre*.

Il semble que ce problème intervienne d'abord dans un contexte intra-mathématique puisqu'interne à un langage formel donné. En mécanique céleste, le modèle de ce type de rapport est celui qui existe entre les lois de Kepler et la théorie de la gravitation de Newton. L'installation commune des *formulations* des unes (lois de Kepler) et des autres (principe fondamental de la dynamique - $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ - et loi de gravitation) dans le langage commun de l'analyse différentielle permet en effet une *déductibilité mathématique* des lois de Kepler à partir de la théorie de Newton. Cela fonde le paradigme de l'explication vue comme déduction (Hempel, 1965). Dans ce cas, la détermination de la loi par le processus est de la nature d'un *raisonnement*. Si, en outre, on peut montrer que la loi empirique est déterminable de manière plurivoque, cela signifie qu'on peut lui trouver différentes bases rationnelles équivalentes et éventuellement contradictoires. Il s'agit alors spécifiquement d'une *sous-détermination P/L par raisonnement*.

Mais pour certains géographes, le terme d'« explication » ne dénote pas toujours le procédé déductif de pur raisonnement qui semble valoir pour le rapport Newton-Kepler. Très significativement, Chorley et Haggett (1967) revendiquent une autre définition - hétérodoxe à l'époque dans ce contexte de la géographie théorique¹⁷ - pour l'explication, celle du physicien Percy W. Bridgman, qui remontait pourtant à 1936 :

Une explication consiste en le fait d'analyser nos systèmes compliqués en systèmes plus simples de telle manière que nous reconnaissons dans les systèmes compliqués l'interaction d'éléments pour nous déjà si familiers que nous les acceptons comme ne nécessitant pas d'explication (Bridgman, 1936 : 63)¹⁸.

Expliquer revient de ce point de vue non à raisonner conceptuellement mais 1) à concevoir des *modèles d'interaction* - donc des computations dans le formalisme - entre des éléments simples et 2) à tester si ces seuls éléments, avec leurs interactions simples elles aussi mais nombreuses et enchevêtrées, peuvent, à l'issue du processus, imposer des valeurs de variables qui leur permettent de vérifier approximativement la loi qui les lie, loi que l'on connaît par ailleurs par des moyens empiriques. Si, avec cette approche, on tombe sur une sous-détermination P/L, elle sera à distinguer au moins formellement de la *sous-détermination P/L par raisonnement*. En effet, en mathématiques, du fait des théorèmes d'incomplétude, on ne peut pas toujours obtenir par raisonnement les résultats que l'on peut obtenir par calcul¹⁹. Il nous paraît donc préférable de supposer que la *sous-détermination P/L par calcul* ne se réduise pas toujours - au moins en droit si pas en fait²⁰ - à une *sous-détermination P/L par raisonnement*.

¹⁷ Deux promoteurs influents de l'approche nomothétique en géographie, Schaefer (1953) et Bunge (1967), conçoivent ainsi l'explication avant tout comme une déduction du fait à expliquer à partir de l'application d'une théorie à un fait initial.

¹⁸ Cité par (Chorley, Haggett, 1967 : 24). Notre traduction.

¹⁹ Les calculs sont à base d'algorithmes et les raisonnements à base d'axiomes. On fait souvent l'erreur de penser que découvrir la possibilité de formaliser de manière mathématique une dynamique entre formules, c'est réduire au calcul le passage de l'une à l'autre : or, « une fois la mécanique mathématisée [avec Newton], la résolution d'un problème demande non un calcul mais un raisonnement » (Dowek, 2011 : 80).

²⁰ Au moins eu égard à l'état des théories mathématiques disponibles au moment où l'on considère cette sous-détermination P/L par calcul.

2.2. Sous-détermination P/L par calcul en géographie humaine : la loi rang/taille

À la fin des années 1950, la géographie humaine prend conscience de l'existence de cas de *sous-détermination P/L par calcul*. Considérons la loi rang/taille des villes mise en évidence en 1913 par le physicien allemand Félix Auerbach (1856-1933) puis popularisée par le linguiste et statisticien George K. Zipf (1902-1950). Cette loi empirique stipule qu'il existe cette relation formelle entre le rang d'une ville et sa population :

$$r_i \cdot (p_i^q) = K$$

où r_i est le rang de classement de la ville i , p_i sa population en nombre d'habitants, q et K sont des constantes, quelle que soit la ville²¹.

Cette loi empirique est assez largement observée, y compris dans des contextes socio-économiques très différents. Dans leur travail sur les explications alternatives de la loi rang/taille, (Berry et Garrison, 1958) font la synthèse des modèles de processus susceptibles d'expliquer cette loi.

Le modèle explicatif de processus propre à Zipf suppose qu'il y a deux tendances contraires et à base psychologique qui président à la dispersion ou au regroupement des implantations humaines. Ces tendances relèvent toutes deux du principe du « moindre effort ». Il y a d'une part la *tendance à la diversification* des lieux d'implantation : elle a pour effet de minimiser la difficulté de mouvoir les matériaux bruts extraits de la terre (essentiellement au départ des produits de l'agriculture). Il y a d'autre part la *tendance à l'unification* qui a pour effet de minimiser la difficulté de mouvoir des produits élaborés lors de leur transfert vers la population qui en fera la consommation. Ainsi, la force de diversification travaille dans le sens d'un plus grand nombre de petites communautés alors que la force d'unification travaille dans le sens d'un nombre restreint de grandes communautés (Zipf, 2012 [1949] : 359). Comme le rappellent aussi Berry et Garrison (1958 : 86), le géographe allemand Christaller (1968 [1933]) avait proposé un processus explicatif d'emblée économique-géométrique pour la mise en place spatiale sur un territoire homogène d'une hiérarchie de villes, à savoir un réseau géométrique de type hexagonal. Or, une telle géométrie permet un décompte des villes qui retrouve le rapport harmonique de type rang/taille. Berry et Garrison (1958) montrent ensuite que la loi rang/taille peut être aussi engendrée au moyen du concept d'*opportunité économique* propre à la théorie de mathématique sociale de Rashevsky (1944). Enfin l'article se termine sur l'explication purement probabiliste que propose Herbert Simon (1955), c'est-à-dire sans scénario causal thématique sous-jacent qui serait de type géométrico-économique (Christaller), psychologique (Zipf) ou encore psychologico-économique (Rashevsky). Comme l'expliquera plus tard Denise Pumain (1982 : 24), du point de vue le plus général, la loi rang/taille n'est en fait elle-même qu'une fonction de répartition d'une variable aléatoire. Vu comme cela, il paraît assez facile d'inventer un *modèle probabiliste* - comme le fait Simon - sous la forme d'un *processus stochastique* engendrant une telle distribution. De manière surprenante, devant une telle *sous-détermination P/L*, Berry et Garrison ne concluent pas au caractère problématique du questionnement lui-même mais en tirent au contraire le projet de trouver leur propre processus explicatif, encore plus réaliste.

Pumain se penchera aussi sur ces explications alternatives (Pumain, 1982) mais préférera l'explication plus simple et surtout ontologiquement économe par la loi dite de l'effet proportionnel de Gibrat²² : cette loi convient aux processus multiplicatifs. À la différence du processus stochastique de Simon, cette loi est en effet directement équivalente à la loi lognormale, c'est-à-dire à la loi de probabilité dont le logarithme suit une loi normale. On sait que la fréquence de la loi normale dans nos observations empiriques repose sur la fréquente validité dans le monde empirique des hypothèses du théorème mathématique dit « théorème central limite ». Ce théorème énonce que la somme de variables aléatoires indépendantes (de lois quelconques) converge vers une loi normale. Or, on peut considérer qu'une loi lognormale (et donc rang/taille) émerge là aussi fréquemment et assez

²¹ Pour Zipf, si $q = 1$, on a une distribution parfaitement harmonique : New York est la plus grande ville des Etats-Unis (de taille K), la deuxième a une population égale à la moitié de celle de New York ($K/2$), la troisième égale au tiers ($K/3$), la quatrième au quart ($K/4$), etc. Voir (Zipf, 1941 : iii).

²² Voir aussi (Robson, 1973 : 37). Sur la loi de l'effet proportionnel de Gibrat, voir (Armatte, 1995).

naturellement quand on a affaire à un phénomène cette fois-ci non additif mais multiplicatif entre lois indépendantes et dont le logarithme – ou, ce qui revient au même, la somme des logarithmes - obéit lui-même au théorème central limite²³.

Ces arguments ne convaincront pas tous les géographes quantitativistes, sans même parler des tenants de la physique sociale. En 1967, par exemple, Berry lui-même continuera à chercher la meilleure théorie pour déduire la loi rang/taille (Berry, 1971 [1967]). Récemment encore, dans un article de 2012, Berry trouve une certaine naturalité et un certain fondement théorique pour la valeur 1 de l'exposant q de la loi de Zipf (Berry & Okulicz-Kozarin, 2012 : S21) ce qui lui est reproché par un article encore plus récent de Denise Pumain (Pumain, 2012 : 34)²⁴.

2.3. Sous-détermination P/L par calcul en géographie physique : les lois de Horton-Strahler

On pourrait penser qu'il est après tout normal que la sous-détermination P/L affecte de façon privilégiée les sciences humaines. Denise Pumain ne parle-t-elle pas de la diversité de nos rationalités ? Il est donc sans doute piquant et – nous le pensons – très révélateur du statut réel de certains formalismes, comme de la réalité de leurs rapports mutuels et de la variété des interprétations quant à elles circonstanciées de cette réalité, de s'apercevoir que les premières formalisations de processus à être apparues dans la géomorphologie d'après-guerre et ensuite à avoir été brandies comme autant d'exemples devant les yeux de la géographie humaine, ces formalisations pouvaient finalement être démontrées par la suite elles-aussi extrêmement sous-déterminées.

En 1993, en effet, un géophysicien de Berkeley, James Kirchner, publie une étude de simulation systématique (*i.e.* par calcul computationnel et non par calcul formel) qui montre que l'on retrouve des lois de Horton pour presque tout type de réseau²⁵. Par conséquent, il paraît erroné selon Kirchner :

1) de continuer à tester des modèles de processus hypothétiques pour les bassins de drainage en essayant de leur faire engendrer les lois de Horton car quasiment tout processus engendrant un réseau convient de ce point de vue-là et est donc sous-déterminé d'un point de vue calculatoire ;

2) de faire accroire que de telles lois manifestent nécessairement l'œuvre d'un principe thermodynamique d'optimalité (Chorley).

3) de penser même *a minima* que seuls les réseaux topologiquement aléatoires, c'est-à-dire engendrés par des processus de marche aléatoire dits stochastiques, et dont feraient éminemment partie les réseaux réels de cours d'eau, présentent de telles lois géométriques et morphologiques (Shreve, 1966) (Kirchner, 1993 : 591-592).

Cette preuve par simulation montre de manière éclatante que certaines lois morphologiques sont, de manière native, affectées d'une *sous-détermination P/L par calcul*. Elles montrent aussi qu'il n'est pas toujours évident, surtout pour les thématiciens non spécialistes en mathématiques discrètes, de s'en convaincre *a priori* : ce qui apporte la preuve qu'une *sous-détermination P/L par calcul* n'est pas toujours traduisible ni donc anticipable par une *sous-détermination P/L par raisonnement*. Le rôle des approches computationnelles est donc ici clairement inédit et décisif. Les travaux de Kirchner viennent montrer par ailleurs qu'une telle sous-détermination touche aussi bien la géographie physique que la géographie humaine.

3. RECURRENCE ET FECONDITE DU PROBLEME

Nous voudrions suggérer, dans cette dernière section que cette séquence constitue une scène première en géographie de modélisation, et peut être au-delà dans toute science recourant à la modélisation de type computationnel. Les années passant, l'usage de l'ordinateur non plus seulement comme machine à traiter ou « ordonner » des données - *i.e.* comme « ordinateur » au sens étroit - mais comme machine servant aussi à modéliser et simuler au moyen de computations - *i.e.* comme « computer » au sens large - s'est en effet diffusé et la familiarité avec de telles sous-déterminations

²³ On a une évocation de cette possibilité dans (Pumain 1982 : 27). Voir aussi (Pumain, 2012 : 46).

²⁴ Nous montrons dans Varenne (à paraître, Chapitre 2, Section 3) que cette naturalité des valeurs de l'exposant dans la loi de Zipf est souvent un enjeu pour les tenants de la physique sociale comme John Q. Stewart.

²⁵ (Kirchner, 1993 : 593).

s'est accrue. Elle a été appréhendée plus frontalement et avec diverse stratégies méthodologiques et épistémologiques.

Dans le cas du travail de thèse de Denise Pumain, cette sous-détermination est interprétée comme conférant aux lois morphologiques non plus le rôle de formes étonnantes à expliquer mais celui de formes-cadres banales, de formes-contraintes s'imposant par défaut à toute activité humaine liée à la ville. Les lois morphologiques ne servent plus d'orientés pour la recherche de modèles de processus mais seulement de garde-fous. C'est-à-dire que si l'on conçoit un modèle de processus qui ne parvient pas à approximer une loi morphologique, on peut considérer que ce modèle est au moins à modifier. Mais si un tel modèle converge vers une loi morphologique, cette convergence n'en est pas même une corroboration étant donné la force de la sous-détermination P/L par calcul. Pumain distingue ainsi les modalités de croissance urbaine banales des modalités de croissances urbaines dites spécifiques dont elle peut rechercher alors des explications historiques, économiques et géographiques spécifiques (Pumain, 1982 : 189-192).

Si l'on se penche maintenant sur le travail de thèse de Lena Sanders (1992), on voit apparaître une argumentation qui donne également un rôle central à la sous-détermination et à son traitement explicite. C'est elle qui justifie le choix du type de formalisme supposé être le mieux à même de modéliser la dynamique des systèmes de villes, la synergetique. À la différence de la systémique, du fait qu'elle s'appuie sur la mécanique statistique, la synergetique permet la représentation explicite de certains mécanismes génériques d'interaction, cela en prenant en compte plusieurs niveaux d'entités : micro, méso, macro. Elle redonne par là un certain poids aux mécanismes. Elle permet également l'intégration de relations déterministes et stochastiques comme aussi l'intégration de relations non-linéaires. Ce qui permet de modéliser des bifurcations. La modélisation par la synergetique se distingue donc d'un modèle complexe de simulation dans lequel la diversité des individus sociaux serait explicitement représentée (Varenne, 2010a : 28). En abordant les individus en moyenne, une telle approche ne modélise donc pas de processus réalistes d'interaction au niveau individuel (Sanders, 1998 : 375). Comme il sous-détermine les processus d'interaction au niveau individuel, ce type de modèle permet une explication seulement partielle. Il sert à explorer les scénarios possibles et à les probabiliser.

Lorsque Pierre Frankhauser - physicien de formation - s'attaque à sa thèse de géographie (Frankhauser, 1994), sous la direction de Denise Pumain, c'est pour étudier la fractalité de certaines structures urbaines, c'est-à-dire cette propriété qu'ont certaines structures spatiales de présenter une forme qualitativement invariante à différentes échelles. Alors que quelques années plus tôt, on aurait considéré cette fractalité comme une loi morphologique étonnante et demandant à être expliquée de manière univoque, Frankhauser est prudent. Il montre que ce ne peut être toujours les mêmes modèles de processus qui sont en jeu pour les différentes fractalités repérées (villes, quartiers, réseaux de transport) et qu'on ne sait pas si les modèles suggérés sont les meilleurs possibles. Son travail se termine par la proposition d'un *modèle de simulation* de croissance urbaine à base d'automates cellulaires²⁶. Au final, il insiste sur la fonction de *modèle d'analyse* de l'approche par les fractales plutôt que sur celle de *modèle de synthèse*.

L'approche par les automates cellulaires aura par la suite un grand succès essentiellement du fait qu'elle permet une meilleure identifiabilité des paramètres des modèles. Dès les années 1950 et 1960, les travaux de Torsten Hägerstrand puis ceux de Valdo Tobler²⁷ avaient montré la voie. Ils se concentraient déjà davantage sur la simulation directe des règles et des mécanismes d'interaction opérant au niveau individuel que sur la recherche de modèles de processus susceptibles d'engendrer des lois empiriques prédéfinies. La question de la sous-détermination de ces processus était donc en partie court-circuitée dès lors que la validité - ou crédibilité - des modèles de simulation était largement obtenue en amont du test du modèle et non en aval.

²⁶ Un automate cellulaire (AC) est un système dynamique discret. On le définit en se donnant une grille - souvent un quadrillage - dont le rôle est de proposer des emplacements possibles pour des cellules. Ces cellules naissent, survivent ou meurent à chaque pas de temps en fonction des cellules avoisinantes. Se donner un AC précis, c'est se donner une grille, des cellules initiales disposées sur cette grille et les règles de naissance et de mort des cellules. Dans le chapitre 12 de (Varenne, 2010b) intitulé « La simulation comme computation spatialisée », nous montrons combien cette technique initialement développée par les mathématiciens et physiciens Ulam et Metropolis rend la formalisation bien plus sensible à l'espace et son hétérogénéité.

²⁷ Voir notamment (Hägerstrand, 1952) et (Tobler, 1979).

Les progrès du matériel informatique comme l'exemple du développement voisin des Systèmes d'Informations Géographiques ont ensuite incité les géographes modélisateurs à passer plus largement, dans les années 1990, des modèles mathématiques aux modèles de simulation²⁸. Un système d'informatique géographique (SIG) en effet est un système de bases de données géographiques à vocation d'intégration. Il met en correspondance plusieurs séries de données géographiques de nature très diverse, cela de manière à permettre certes l'établissement de plans et de cartes, mais aussi à contribuer - comme terrain virtuel plus ou moins stylisé - au test de modèles et de simulations. Aujourd'hui, le débat sur la recherche de simplicité *versus* la recherche de réalisme dans les modèles de simulation aborde constamment, mais indirectement, la question de la *sous-détermination P/L par calcul*. Ainsi, on distingue aujourd'hui les types de modèle en fonction du niveau de phénomènes modélisés : si l'on vise le réalisme pour l'expérimentation virtuelle, il faudra représenter des phénomènes particuliers. Mais si l'enjeu de la modélisation est la recherche d'explication et de mécanismes généraux, il faudra installer le modèle au niveau d'un fait stylisé, c'est-à-dire, pour la géographie des villes, au niveau d'« une organisation spatiale type qui se répète d'une ville à l'autre » (Banos & Sanders, 2013 : 848) comme par exemple la ségrégation de l'espace urbain. On assume là encore le problème de la sous-détermination car on suppose qu'il existe plusieurs fonctions des modèles, y compris pour les modèles génératifs que sont les modèles de simulation²⁹.

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons d'abord montré combien la mise en évidence de lois morphologiques empiriques valant aussi bien en géographie humaine qu'en géographie physique avait pu jouer comme un facteur favorisant l'approche théorique et par modélisation. L'existence de telles lois était pour certains géographes - dont exemplairement Richard Chorley - une incitation au traitement conjoint des problèmes (géographie physique, géographie humaine) et à la recherche de *modèles de processus généraux*.

Nous avons cependant montré qu'une sous-détermination non triviale, de type *processus/loi par calcul*, avait fini par être mise en évidence en géomorphologie. Cette dernière rejoignait là sa compagne à qui elle avait d'abord prétendu donner des leçons de scientificité : nous avons ainsi rappelé en quels termes la géographie humaine, spécifiquement pour le cas de l'explication de la loi rang/taille des villes, a pu elle aussi connaître une semblable sous-détermination.

C'est enfin la récurrence de ces *sous-déterminations* qui nous a amené à l'idée que la géographie de modélisation - si elle avait été en recherche de théories comme elle le prétendit d'abord - aurait pu les percevoir comme autant de catastrophes. Ce qui ne fut pas le cas. Ainsi, cet article a suggéré, pour finir, que la fécondité propre à la géographie de modélisation tient maintenant à sa capacité à affronter diversement cette question de la sous-détermination, à innover par là en termes de concepts, de mécanismes plausibles comme aussi de niveaux plausibles de mécanismes.

BIBLIOGRAPHIE

- ACKERMAN Edward, 1963. "Where is a Research Frontier?" *Annals of the Association of American Geographers*, 53(4), p. 429-440.
- ARMATTE Michel, 1995. « Robert Gibrat et la loi de l'effet proportionnel », *Mathématiques et Sciences Humaines*, 129, p. 5-35.
- ATLAN Henri, 1990. « Des limites de la science au besoin de philosopher », dans *Science et philosophie, pour quoi faire ?*, Roger Pol-Droit dir., Paris, Le Monde Éditions, p. 142-159.

²⁸ Voir un historique dans (Banos, Sanders, 2013).

²⁹ Pour une caractérisation des différents types de simulations et des différents rapports entre modèle formel et simulation, voir (Varenne, 2007 : 181-211). Pour une classification des modèles (dont les modèles de simulation) selon vingt différentes fonctions épistémiques, voir (Varenne, 2011 : 166-174) et (Varenne, Silberstein, 2013 : 11-49).

- BANOS Arnaud et SANDERS Lena, 2013. « Modéliser et simuler les systèmes spatiaux en géographie », dans *Modéliser & simuler. Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation – Tome 1*, Franck Varenne et Marc Silberstein dir., Paris, Matériologiques, p. 839-869.
- BERGMANN Gustav, 1957. *Philosophy of Sciences*, Madison, The University of Wisconsin Press.
- BERRY Brian, 1971. *Géographie des marchés et du commerce de détail*, Paris, Armand Colin (1ère édition: 1967).
- BERRY Brian et GARRISON, William, 1958. “Alternate Explanations of Urban Rank–Size Relationships”, *Annals of the Association of American Geographers*, 48 (1), p.83-91.
- BERRY Brian et OKULICZ-KOZARIN Adam, 2012. “The city size distribution debate: Resolution for US urban regions and megalopolitan areas”, *Cities*, 29, S17–S23.
- BILLINGE Mark, GREGORY Derek et MARTIN Ron dir., 1984. *Recollections of a Revolution – Geography as Spatial Science*, London, Macmillan Press Ltd.
- BRIDGMAN Percy W., 1936, *The Nature of Physical Theory*, Princeton, Princeton University Press.
- BUNGE William, 1966. *Theoretical Geography*, Lunds Studies in Geography, Series C, 2nde édition augmentée (1ère édition : 1962).
- BURTON Ian, 1963. “The quantitative revolution and theoretical geography”, *The Canadian Geographer*, 1963, VII (4) p. 151-162.
- CHORLEY Richard. 1957, “Climate and Morphometry”, *The Journal of Geology*, 65 (6), p. 628-638.
- CHORLEY Richard. 1962, “Geomorphology and General Systems Theory”, *Theoretical papers in the hydrologic and geomorphic sciences*, US Geological Survey, Professional Paper, n°500B.
- CHORLEY Richard, 1964. “Geography and Analogue Theory”, *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1), p. 127-137.
- CHORLEY Richard, 1967. “Models in Geomorphology”, dans *Models in Geography*, Richard Chorley et Peter Haggett dir., London, Methuen & Co Ltd.
- CHORLEY Richard dir., 1973. *Directions in Geography*, London, Methuen & Co Ltd.
- CHORLEY Richard et HAGGETT Peter dir., 1967. *Models in Geography*, London, Methuen & Co Ltd.
- CHORLEY Richard et KENNEDY Barbara, 1971. *Physical Geography: a Systems Approach*, London, Prentice Hall.
- CHRISTALLER Walter, 1968. *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, réimpression inchangée de la première édition (1ère édition : Jena, 1933).
- CLAVAL Paul, 1982. *La nouvelle géographie*, Paris, PUF, 2^{ème} édition mise à jour (1^{ère} édition : 1977).
- DOWEK Gilles, 2011. *Les métamorphoses du calcul*, Paris, Le Pommier.
- FRANKHAUSER Pierre, 1994. *La fractalité des structures urbaines*, Paris, Economica.
- HÄGERSTRAND Torsten, 1952, “The propagation of innovation waves”, *Lund Studies in Geography*, Series B, vol. 4, p. 3-19.
- HAGGETT Peter et CHORLEY Richard, 1969. *Network Analysis in Geography*, London, Arnold.
- HARVEY David, 2011. *Explanation in Geography*, Jaipur (India), Rawat Publication, 2011 (1ère édition : London, Arnold, 1969).
- HEMPEL Carl, 1965. *Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science*, New York, The Free Press.
- HORTON Robert, 1945. “Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology”, *Geological Society of America Bulletin*, 1945, Vol. 56, p. 275-370.
- HUGGETT Richard, 2007, “A history of the systems approach in geomorphology”, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2007, n°2, p. 145-158.
- JOHNSTON Ronald, 1997. *Geography and Geographers – Anglo-American Human Geography since 1945*, 5th edition, London, Arnold.
- KING Leslie, 1979. “The Seventies: Disillusionment and Consolidation”, *Annals of the Association of American Geographers*, 69 (1), p. 155-157.
- KIRCHNER James, 1993. “Statistical inevitability of Horton’s law and the apparent randomness of stream channel networks”, *Geology*, 21, p. 591-594.
- ORAIN Olivier, 2009. *De plain-pied dans le monde, Ecriture et réalisme dans la géographie française au XX^e siècle*, Paris, L’Harmattan.
- PUMAIN Denise, 1982. *La dynamique des villes*, Paris, Economica.
- PUMAIN Denise, 2012. « Une théorie géographique pour la loi de Zipf », *Région et développement*, 36, p. 31-54.

- PUMAIN Denise et ROBIC Marie-Claire, 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, p. 123-144.
- PUMAIN Denise, SANDERS Lena et SAINT-JULIEN Thérèse, 1989. *Villes et auto-organisation*, Paris, Economica.
- QUINE Willard van Orman, 2003, *Du point de vue logique*, Paris, Vrin (1^{ère} édition : 1953).
- RASHEVSKY Nicholas, 1944. “Contributions to the mathematical theory of human relations VIII : Size distributions of cities”, *Psychometrika*, 9 (3), p. 201-215.
- ROBSON Brian, 1973. *Urban growth: an approach*, London, Methuen & Co Ltd.
- SANDERS Lena, 1992, *Système de villes et synergie*, Paris, Anthropos-Economica.
- SANDERS Lena, 1998. « La dynamique d’un système de villes : les apports d’une modélisation par la synergie », *Cahiers de Géographie du Québec*, 42 (117), p. 367-377.
- SCHAEFER Fred, 1953. “Exceptionalism in Geography: A Methodological Examination”, *Annals of the Association of American Geographers*, 43(3), p. 226-249.
- SCHEIBLING Jacques, 2011. *Qu’est-ce que la géographie ?*, Paris, Hachette Supérieur, 2^{ème} édition revue et augmentée (1^{ère} édition : 1994).
- SHREVE Ronald., 1966. “Statistical laws of stream numbers”, *Journal of Geology*, 74, p. 17-37.
- SIMON Herbert, 1955. “On a Class of Skew Distribution Functions”, *Biometrika*, 42 (3/4), p. 425-440.
- STANFORD Kyle, 2013, “Underdetermination of Scientific Theory”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2013 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/win2013/entries/scientific-underdetermination/>>
- STASZAK Jean-François, 2001. « La géographie », dans *Epistémologie des sciences humaines*, Jean-Michel Berthelot (dir.), Paris, PUF, p. 77-116.
- STRAHLER Arthur, 1950. “Davis’ concepts of slope development viewed in the light of recent quantitative investigations”, *Annals of the Association of American Geographers*, 40(3), p. 209-213.
- STRAHLER Arthur, 1952. “Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography”, *Geological Society of America Bulletin*, 63, p. 1117-1142.
- TOBLER Waldo, 1979, “Cellular Geography”, dans *Philosophy in Geography*, Stephen Gale et Gunnar Olsson (dir.), Dordrecht, Reidel, p. 379-386.
- VARENNE Franck, 2007. *Du modèle à la simulation informatique*, Paris, Vrin.
- VARENNE Franck, 2010a. « Les simulations computationnelles dans les sciences sociales », *Nouvelles perspectives en sciences sociales*, 5 (2), p. 17-49.
- VARENNE Franck, 2010b. *Formaliser le vivant : lois, théories, modèles ?*, Paris, Hermann.
- VARENNE Franck, 2011. *Modéliser le social – Méthodes fondatrices et évolutions récentes*, Paris, Dunod.
- VARENNE Franck, à paraître. *Théories et modèles en géographie. Une introduction historique et épistémologique*.
- VARENNE Franck et SILBERSTEIN Marc, 2013. *Modéliser & simuler. Épistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation*, Tome 1, Paris, Matériologiques.
- VON ELVERFELDT Kirsten, 2012. *System Theory in Geomorphology: Challenges, Epistemological Consequences and Practical Implications*, New York, Springer.
- ZIPF George, 1941. *National Unity and Disunity*, Bloomington, Indiana, The Principia Press.
- ZIPF George, 2012. *Human Behavior and the Principle of the Least Effort – An Introduction to Human Ecology*, Mansfield, Martino Publishing (1^{ère} édition : Cambridge, Addison-Wesley, 1949).