

# Introduction

Céline VACCHIANI-MARCUZZO<sup>1</sup> et Denise PUMAIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR Géographie-cités, Université Paris Cité, France

<sup>2</sup> UMR Géographie-cités, CNRS, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, France

L'objectif de cet ouvrage est de porter un regard à la fois novateur et critique sur les lois d'échelle en géographie. De nombreux chercheurs issus de disciplines jusqu'ici éloignées de la géographie « investissent » l'objet « ville » tels les physiciens, les mathématiciens ou les informaticiens. Les nouvelles grandes bases de données qui renseignent tant sur la morphologie urbaine que sur la mobilité des personnes (les *Big Data*) suscitent en effet de la convoitise... Mais que disent-elles vraiment de la ville ou des villes ? De leur fonctionnement et de leur évolution ? Cette introduction précise notre position épistémologique à la recherche de formalisations qui soient pertinentes et acceptables pour des objets de sciences sociales, entre la tentation de produire une nouvelle « science des villes » (Batty 2013) entièrement formalisée et une théorisation davantage ancrée dans les processus socio-environnementaux (Pumain 2020).

L'échelle, qu'elle concerne des observations ou des processus, est un concept qui traverse toutes les sciences. Mais un principe aussi général peut-il aussi les réunir ? En particulier, des « lois d'échelle », considérées comme des « signatures » de la complexité, expérimentées en physique et transposées avec un certain succès en biologie sont-elles de nature à éclairer des processus sociaux ? Dans la mesure où les effets d'échelle sont au cœur des inégalités observées dans les sociétés, entre les personnes, entre les entreprises ou entre les territoires, le transfert de modèle est particulièrement utile, mais aussi sensible et risqué, et donc une grande attention doit être portée à ses conditions de possibilité.

*Des lois d'échelle et des villes,*

coordonné par Céline VACCHIANI-MARCUZZO et Denise PUMAIN. © ISTE Editions 2025.

Un des risques serait notamment de « naturaliser » des processus sociaux, c'est-à-dire de justifier des situations sociales, économiques et politiques, par des « lois » qui seraient universelles. Ces lois devraient être admises parce qu'elles seraient « naturelles », d'origine biologique, et ayant donc été sélectionnées par l'évolution. Dans ce domaine, les excès analogiques ont été souvent dénoncés, tels ceux de la « sociobiologie » de Wilson (1975) qui liait des comportements sociaux à des caractères supposés héréditaires et adaptatifs. Le biologiste généticien R. Lewontin (1980) a récusé ce type de déterminisme biologique et contesté le peu de scientificité méthodologique de ce courant sociobiologique, trop souvent récupéré par des idéologies politiques racistes ou conservatrices. Mais cette vigilance critique ne doit pas nous empêcher d'utiliser la puissance de synthèse offerte par des formalisations mathématiques pour décrire ce qui, dans les villes ou les systèmes de villes, s'apparente à ce qui est observé dans d'autres systèmes complexes. Nous pensons, comme Lahire (2023), qu'il est possible de définir des « lois sociales » à partir d'universaux observés dans les sociétés humaines et, sans les ignorer, de considérer les écarts à ces lois, ou les processus qui leur échapperaient totalement, comme spécifiques de différences entre les cultures.

Les lois d'échelle dont il est question dans cet ouvrage sont des modèles mathématiques élaborés par des physiciens pour établir des relations entre l'existence d'objets de différentes tailles et des processus qui assurent le fonctionnement et la croissance de ces entités (West 2018 ; D'Acci 2024). Des lois allométriques observées en biologie montraient que l'existence des êtres vivants les plus grands a été rendue possible parce que, au cours de l'évolution, des économies d'échelle ont été réalisées dans leur métabolisme. La consommation d'énergie par unité de masse devient en effet de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on considère des organismes ayant des tailles de plus en plus grandes. Les physiciens ont formalisé, sous forme de lois d'échelle, des relations bien ajustées par un modèle mathématique de fonction puissance, avec un exposant inférieur à 1 pour résumer cette relation entre l'énergie consommée et la masse des entités. Ils ont montré que ces « économies d'échelle », selon l'expression familière aux économistes analystes des structures d'entreprise, sont rendues possibles par l'organisation spatiale, en réseaux de structure fractale, des systèmes biologiques des organismes vivants qui apportent en bout de chaîne l'énergie aux plus petits organes consommateurs (les cellules) (West *et al.* 1997). Une telle théorie est-elle transposable aux systèmes étudiés par les sciences sociales ?

Cet ouvrage analyse comment le transfert de modèle a pu être proposé, en partie réalisé, mais aussi critiqué, pour des applications aux systèmes urbains. En quoi l'organisation des villes dans les territoires est-elle comparable à celle des cellules d'un organisme vivant ? À première vue, il existe des arguments en faveur de l'analogie, d'une part parce que l'habitat humain a produit des villes dont les tailles sont très inégales, et d'autre part du fait de la structure fractale de la plupart des réseaux qui ont été organisés pour assurer le fonctionnement des populations et des activités à l'intérieur des villes

et entre les villes (Tannier 2024). Mais l'organisation sociale réserve des surprises et apporte des limites aux analogies biologiques, car ces réseaux ne procurent pas tous des économies d'échelle. Au contraire, certaines activités urbaines ont un métabolisme plus productif et dépensier qu'économe, elles suscitent à la fois des rendements et des coûts qui croissent avec la dimension de leurs entités. Des lois d'échelle avec des exposants plus grands que 1 résument parfois très bien ces observations. Pour les expliquer, il faut intégrer dans la théorie d'autres processus que ceux qui sont à l'œuvre en biologie. Ces processus impliquent notamment la capacité créative des sociétés et la vitesse de transformation soutenant leurs innovations, considérablement plus rapides dans le monde social que celles de l'évolution biologique, mais pas seulement. Les controverses sont encore vives à ce sujet, car, comme toujours dans les sciences, il est difficile de s'accorder sur les indicateurs qui soutiennent telle ou telle explication théorique et de rendre opérationnelles et consensuelles leurs définitions.

Les enjeux de ces discussions théoriques sont colossaux, car elles se produisent à un moment de l'histoire où le futur des villes est plus que jamais mis en question. Faut-il continuer à laisser croître les plus grandes villes avec des inégalités sociales de plus en plus criantes, ou au contraire éviter que les plus petites ne continuent à perdre de leur substance et les régions rurales à se dépeupler ? La réponse dépend des observations qui seront faites à partir de mesures précises des métabolismes urbains afin d'identifier les structures urbaines les mieux adaptées à tel ou tel objectif. Par exemple, quel bilan coût/avantage peut être établi pour différents niveaux de taille de ville, avec des indicateurs appropriés, non seulement démographiques et économiques, mais aussi en termes de consommation de ressources, d'émissions polluantes et de respect des biodiversités ? Peut-on quantifier avec des lois d'échelle les évaluations qualitatives de la qualité de vie dans ces villes, de leur capacité à accueillir et promouvoir une diversité de trajectoires de vie ? En somme, comment mesurer et comparer le degré de leur cohésion sociale et leur agilité d'adaptation ? Les évolutions démographiques urbaines sont encore violemment contrastées entre les différentes parties du monde. Une concertation est ici indispensable entre les acteurs chargés des politiques urbaines et les scientifiques pour prendre en compte cette diversité des situations urbaines et des trajectoires des systèmes de villes. Elle l'est également pour aider les décisions prises en faveur tant d'une plus grande justice sociospatiale que du partage des richesses pour la transition écologique.

L'objet de cet ouvrage est de présenter les lois d'échelle dans leur fonctionnement et leur apport en géographie. Nous montrons d'abord le renouvellement des approches et les interactions avec des conceptualisations préalables telles que les notions de centralités ou de hiérarchies (partie 1), nous explorons ensuite ce qu'apporte ce cadre d'interprétation pour améliorer la connaissance du fonctionnement socio-économique des systèmes de villes dans une grande diversité de contextes à l'échelle mondiale (partie 2) et pour reformuler des modèles classiques de l'organisation morphologique et sociale des villes (partie 3). La conclusion dresse un bilan de ces avancées, tout en signalant

certains écueils méthodologiques de ces applications et en énumérant les précautions à prendre pour éviter de passer trop vite de la loi scientifique à la norme planificatrice.

Dans la première partie, les principes issus de la dynamique des systèmes complexes qui justifient le transfert du modèle physique et biologique aux villes sont examinés. Le premier chapitre, rédigé par Denise Pumain, met en parallèle les interprétations des lois d'échelle proposées par deux communautés scientifiques qui se situent à des niveaux d'abstraction différents : comment fusionner les apports de ces disciplines pour faire avancer les connaissances sur un objet commun ? Le chapitre décrit la diversité des applications des lois d'échelle et tente d'établir un bilan clair de leur apport à la science urbaine. Il montre comment elles sont de plus en plus utilisées dans l'argumentaire des enjeux liés à la taille des villes pour les politiques urbaines. Le deuxième chapitre, rédigé par Cécile Tannier et Denise Pumain, approfondit la critique des lois d'échelle sur les plans épistémologique et méthodologique. Sont d'abord rappelées les différentes significations de la notion d'échelle et les principales théories qui ont été avancées pour rendre compte de leurs effets dans le cas des villes. Des principes mathématiques souvent implicites dans certaines interprétations des lois d'échelle, comme celui de l'ergodicité, et leurs implications dans l'application aux sciences sociales sont discutés. Les principales difficultés qui demeurent pour rendre le bilan moins incertain sont énoncées, notamment celles qui tiennent à la qualité et à la pertinence des données utilisées pour illustrer et tester les lois d'échelle.

Les deux chapitres suivants, qui susciteront l'intérêt des spécialistes avertis, complètent cette première partie en récapitulant les très nombreuses formes de modélisation utilisées pour organiser les connaissances en termes de lois d'échelle sur l'organisation des systèmes de villes, hiérarchique, spatiale, fonctionnelle et sociale, et pour en prévoir les effets. Le chapitre 3, rédigé par Cécile Tannier, examine parmi ces modèles générateurs ceux qui reproduisent des lois d'échelle à partir de processus microgéographiques, c'est-à-dire situés au niveau des individus, des ménages ou des entreprises. Les contributions de différentes disciplines (géographie, économie et physique) sont disséquées et comparées. Les modèles microéconomiques urbains, appuyés sur les concepts d'économie et de déséconomie d'agglomération, sont distingués des modèles de physique statistique intégrés dans la *settlement scaling theory* (théorie scalante du peuplement) qui raisonnent à partir de probabilités d'interactions interindividuelles. Ces modèles rejoignent en partie des modèles géographiques anciens comme ceux de la théorie des lieux centraux, ou destinés à engendrer des rendements croissants avec la taille des villes comme ceux de la nouvelle économie géographique. Tous ces modèles sont ensuite comparés du point de vue de leur prise en compte de l'espace, de l'histoire et des différents niveaux d'organisation des systèmes urbains.

En effet, le chapitre 4, rédigé par Cécile Tannier, recense une autre catégorie de modèles qui prennent en compte les lois d'échelle comme une propriété émergente produite, à des échelles supérieures à celle des individus, par des interactions entre les villes.

Trois ensembles de processus jouent à cette échelle : la configuration des interactions spatiales entre les villes, l'intensité et la diversité des spécialisations fonctionnelles (formes de la division du travail entre elles) et la diffusion hiérarchique des innovations. Les modèles analysés sont classés des plus parcimonieux aux plus intégratifs, c'est-à-dire qui intègrent davantage d'observations empiriques de l'évolution des villes. Leurs capacités à reproduire les trajectoires dynamiques observées pour des entités urbaines en incluant les lois d'échelle sont comparées.

La deuxième partie rassemble des travaux dont l'objectif est d'utiliser les lois d'échelle comme des instruments pour décrire, analyser et comparer les hiérarchies urbaines et caractériser leur évolution, dans l'espace et dans le temps. Le chapitre 5, rédigé par Céline Vacchiani-Marcuzzo et Fabien Paulus, pose la question de la diversité des résultats entre pays industrialisés et pays émergents et la résout en faisant appel au processus de diffusion des innovations. À partir de définitions, de délimitations urbaines et de nomenclatures socio-économiques comparables, les systèmes de villes des États-Unis et de la France d'une part et de l'Afrique du Sud d'autre part donnent ainsi des illustrations des lois d'échelle qui rendent leurs interprétations plus concrètes et plus intelligibles. Le chapitre 6, rédigé par Olivier Finance et Denise Pumain, concerne l'ensemble des villes des pays de l'Union européenne, qui constituent un système sans doute moins bien intégré que ceux de chacun des pays membres. Après avoir rappelé les bases de la théorie évolutive des systèmes de villes, en termes de cycles adaptatifs pour les fonctions économiques des villes en interaction, les lois d'échelle sont ici appliquées, non plus aux quantités d'emplois selon la taille des villes, mais aux flux d'investissements d'origine étrangère susceptibles de différencier les croissances de leurs activités. Les exposants des lois d'échelle et les écarts à ces lois peuvent alors être interprétés comme des révélateurs de décalages temporels et spatiaux dans un processus d'intégration régionale par les flux financiers. Le chapitre 7, rédigé par Céline Rozenblat, approfondit la question des inégalités d'intégration des systèmes urbains continentaux et nationaux à l'échelle mondiale de 2010 à 2022. Il se fonde sur l'analyse d'une base de données des réseaux des entreprises multinationales couvrant les années 2010, 2013, 2016, 2019 et 2022 dans 2 000 villes du monde définies comme de grandes régions urbaines selon une délimitation homogène et comparable. Ne disposant pas d'une source suffisamment fiable et cohérente pour utiliser les populations des villes dans le monde, l'auteur utilise le nombre d'entreprises multinationales, dont la distribution comporte de très grandes inégalités hiérarchiques, pour comparer ensuite au moyen des lois d'échelle leur plus ou moins grande concentration selon les secteurs d'activité et selon les échelles géographiques de l'analyse.

La troisième partie de l'ouvrage rassemble des travaux exploratoires autour de définitions plus complexes des espaces urbains, qu'ils soient matérialisés par des structures bâties, des populations et des flux de circulation, ou abstraits selon des notions de densité et d'interactions de plus ou moins grande proximité. Le chapitre 8, rédigé par Justin Delloye, Estelle Mennicken, Paul Kilgariff, Rémi Lemoy et Geoffrey Caruso,

utilise les lois d'échelle comme filtre pour mesurer les similitudes de configuration des villes européennes. Les grandes villes ne sont-elles que des répliques homothétiques des plus petites, ou bien ont-elles développé des structures différentes en grandissant ? Selon les attributs urbains considérés, part de sol artificialisé, part de sol dédié au logement et aux infrastructures de transport, densité de population et distance routière, les réponses sont différentes. Le chapitre 9, rédigé par Florent Le Néchet, Benoit Conti et Sylvestre Duroudier, déconstruit en quelque sorte les lois d'échelle pour formaliser l'espace multiscalaire des relations du fonctionnement urbain quotidien, par les navettes domicile-travail à l'intérieur des villes et entre les villes. Alors qu'ils sont généralement utilisés pour identifier des délimitations d'aires urbaines fonctionnelles considérées comme statistiquement cohérentes et significatives, ces flux de déplacements révèlent en fait des fonctionnements parfois multiscalaires de l'espace urbanisé qui offrent un autre point de vue sur le formalisme des lois d'échelle.

La diversité de tous ces chapitres répond à celle des centres d'intérêt et des niveaux de formalisation requis du fait de la très grande interdisciplinarité des applications des lois d'échelle dans le champ urbain. Cet ouvrage est conçu pour apporter à chaque lecteur une information utile, quel que soit son niveau, qu'il découvre les lois d'échelle ou qu'il en soit un expert confirmé.

## Bibliographie

- Batty, M. (2013). *The new science of cities*. MIT Press, Cambridge.
- Boyles, M., Tilman, R. (1993). Thorstein Veblen, Edward, O. Wilson, and sociobiology: an interpretation. *Journal of Economic Issues*, 27(4), 1195–1218.
- D'Acci, L.S. (dir.) (2024). *Urban Scaling: Allometry in Urban Studies and Spatial Science*. Routledge, Londres.
- Lahire, B. (2023). *Les structures fondamentales des sociétés humaines*. La Découverte, Paris.
- Lewontin, R.C. (1980). Sociobiology: Another Biological Determinism. *Int. Journal of Health Services*, 10(3), 347–363.
- Pumain, D. (2020). *Theories and models of urbanization*. Springer, Cham (Suisse).
- Tannier, C. (2024). *La géométrie fractale en géographie humaine et en aménagement*. ISTE Editions, Londres.
- West, G.B., Brown, J.H., Enquist, B.J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276(5309), 122–126.

West, G.B (2018). *Scale, The Universal Laws of Life and Death in Organisms, Cities and Companies*. Weidenfeld & Nicolson, Londres.

Wilson, E.O. (1975). *Sociobiology, the new synthesis*. Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge.