



HAL
open science

Théorie des graphes et analyse de réseau en géographie : histoire d'un lien faible (1950-1963)

Laurent Beauguitte

► To cite this version:

Laurent Beauguitte. Théorie des graphes et analyse de réseau en géographie : histoire d'un lien faible (1950-1963). PasserelleSHS, 2022, Analyse de réseau(x) en SHS, 1, 10.48649/pshs.155 . hal-03652861

HAL Id: hal-03652861

<https://hal.science/hal-03652861>

Submitted on 27 Sep 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

Théorie des graphes et analyse de réseau en géographie : histoire d'un lien faible (1950-1963)

[Laurent Beauguitte](#)

[DOI : 10.48649/pshs.155](#)

Résumé

Dans toutes les disciplines mobilisant l'analyse de réseau, on considère qu'elle est issue de la théorie des graphes, cette dernière étant supposée remonter au XVIII^e siècle. L'étude des premiers textes de géographie prétendant s'appuyer sur la théorie des graphes montre que le lien entre les deux est ténu, la théorie des graphes devenant un domaine des mathématiques clairement identifiable seulement dans les années 1950. Fondée sur une étude approfondie des articles et ouvrages fondant la géographie quantitative nord-américaine, cet article montre que si une poignée de termes est empruntée à la théorie des graphes, les mesures et méthodes proposées sont des créations disciplinaires autonomes visant à répondre à des questions de recherche spécifiques. Ce lien faible entre analyse de réseau et théorie des graphes pourrait sans doute être généralisé aux autres disciplines et pourrait expliquer la faiblesse du dialogue interdisciplinaire jusqu'au milieu des années 2000.

[analyse de réseau](#), [théorie des graphes](#), [géographie quantitative](#), [histoire de la géographie](#)

L'analyse de réseau fait son apparition dans différentes sciences humaines (anthropologie, communication, géographie, etc.) et naturelles (biologie, écologie) entre la fin des années 1940 et le début des années 1960. En à peine plus d'une décennie, différents « programmes de recherche » se mettent en place de façon relativement autonome, même si tous ces programmes de recherche prétendent s'appuyer sur une branche des mathématiques, la théorie des graphes. Cette dernière, si l'on en croit les manuels, trouve ses origines au XVIII^e siècle avec le problème des ponts de Königsberg¹ résolu par le mathématicien suisse Leonhard Euler.

Cet article questionne la création de l'analyse de réseau en géographie et s'interroge sur les liens entre cette dernière et la théorie des graphes. L'hypothèse principale est que les emprunts faits à la théorie des graphes sont modestes, en géographie mais également dans les autres disciplines, pour une raison simple : la construction des programmes de recherche en analyse de réseau est contemporaine de la création de la théorie des graphes. L'analyse de réseau, en géographie et ailleurs, serait en réalité un objet hybride, empruntant à des disciplines diverses, et très largement autonome vis-à-vis d'une branche des mathématiques qui commence seulement à s'autonomiser de la topologie dans les années 1950.

Une première partie aborde l'aspect épistémologique de la question et présente la méthodologie employée pour tenter de valider ces hypothèses. Une deuxième partie s'intéresse à la création de la théorie des graphes et aux liens ténus entretenus avec les différents programmes de recherche d'analyse de réseau. Enfin, la troisième partie s'intéresse au cas de la géographie nord-américaine de la fin des années 1950 et à ses liens avec la théorie des graphes. Si la situation a depuis beaucoup évolué, notamment du fait de l'arrivée des physiciens dans le champ de l'analyse de réseaux à la fin des années 1990 (Ducruet et Beauguitte, 2014), certains

des choix méthodologiques et conceptuels effectués il y a quelques décennies restent prégnants dans l'analyse de réseau pratiquée par la géographie contemporaine.

1. Concepts, méthodes et posture de recherche

Le terme discipline est préféré au terme science dans cet article : les personnes évoquées sont soit des universitaires, soit des chercheurs travaillant dans le cadre de la recherche opérationnelle afin de résoudre des problèmes d'ingénierie, ce dernier cas concerne notamment les travaux d'optimisation des flux très largement financés par la *RAND Corporation* (voir les travaux des mathématiciens Dantzig, Dijkstra, Ford, Fulkerson, Gale, etc.). Une discipline donnée est construite à partir de la science homonyme pour la transmission et l'enseignement ; elle choisit ce qui fonctionne, ce qui produit des résultats, ce qui peut être mis en séquences pédagogiques et en manuels.

L'analyse de réseau dans une discipline donnée est nommée dans cet article « programme de recherche », terme proposé par le philosophe Imre Lakatos (Ulises Moulines, 2006, p. 93-96) et dont l'usage me paraît ici plus pertinent que le terme de paradigme défini par Thomas Kuhn dans la première édition de *La structure des révolutions scientifiques* (1962) ; il indique dans la postface de la deuxième édition (1970) préférer le terme de « matrice disciplinaire ». Si dans la vision de Kuhn, un paradigme chasse l'autre au terme d'une révolution scientifique, plusieurs programmes de recherche sont susceptibles de coexister pour Lakatos. La signification du terme « programme de recherche » dans cet article est cependant plus restreinte que le sens que lui donne Lakatos : il désigne ici un ensemble de méthodes, de concepts, de théories et d'interdits qui encadrent un aspect spécifique d'une pratique scientifique donnée. L'un des marqueurs indiquant qu'un programme de recherche est stabilisé est l'apparition de manuels, ces derniers étant essentiels dans la formation des identités disciplinaires. On peut en effet considérer que ces textes à vocation pédagogique créent une généalogie possible d'un programme de recherche, en insistant sur le rôle des pionniers et des fondateurs, puis génèrent de manière cumulative une *doxa* qu'il devient de plus en plus difficile de questionner. L'étude de la mise en manuels, prévue mais non encore réalisée à ce jour, suppose notamment de partir des textes originaux, de repérer quels textes et quels éléments de ces textes sont retenus et reformulés, mais également d'identifier les textes et auteurs négligés, volontairement ou non. L'étude des différentes éditions, et des modifications effectuées, apparaît également nécessaire pour montrer la transformation progressive d'un ensemble disparate de références en un récit faisant autorité pour la formation des générations scientifiques suivantes.

L'expression « tradition de recherche » est employée pour désigner un ensemble de travaux liés à une thématique particulière, sans que ces travaux soient nécessairement liés par un socle théorique et méthodologique commun. L'étude des infrastructures de transport en géographie est un exemple de tradition de recherche ; l'analyse des réseaux de transport affirmant s'appuyer sur la théorie des graphes est un programme de recherche.

La méthodologie employée est essentiellement qualitative et basée sur une fréquentation lente, assidue et continue des textes, l'un des modèles du genre étant pour moi la relecture attentive du concept bourdieusien de champ par Bernard Lahire dans *Monde commun* (Lahire, 2012, p. 143-223). Une attention particulière est accordée au vocabulaire utilisé, aux mesures et méthodes mobilisées, aux données étudiées et aux choix de modélisation effectués. Une deuxième étape consiste en une fouille bibliographique intensive en amont, c'est-à-dire tenter de récupérer et de lire toutes les références citées dans les articles étudiés². La démarche paraît d'autant plus nécessaire que le vocabulaire est très variable, voire instable, d'un auteur³ et d'une

discipline à l'autre. Afin d'objectiver les résultats, des recherches de termes sont effectuées sur la base de données *JSTOR Data for Research*⁴ dont le catalogue de revues est le plus complet disponible pour la période et l'espace étudiés. Si le risque de surinterpréter les tendances est réel (une expression en 1920 peut avoir un sens différent en 1940 et une expression dans une discipline peut avoir un sens différent dans une autre), cela permet *a minima* de repérer les innovations lexicales et les dynamiques d'emploi de certains termes. Enfin, pour étudier l'impact des articles étudiés et l'évolution de leur réception, une fouille bibliographique en aval est réalisée sur différents portails académiques (Persée, Cairn pour la littérature scientifique francophone ; *Google Scholar* ; portails de revues académiques anglophones). Ce dernier aspect mériterait un article à part entière et ne sera abordé ici que de façon marginale.

En ce qui concerne la posture adoptée, elle vise à être la plus compréhensive possible des écrits et des stratégies des acteurs et de reconstituer ce que Fabrizio Li Vigni nomme dans sa thèse sur l'histoire des instituts des sciences complexes leur « *horizon de rétrospection* » (Li Vigni, 2018, p. 52). Les chercheurs qu'il étudie y incluent « des auteurs qui ne se sont jamais réclamés de la complexité » (*Ibid.*) ; les géographes américains procèdent de la même façon en mobilisant des auteurs ne se réclamant pas de la théorie des graphes. Toute discipline scientifique au cours de son histoire est susceptible d'emprunter à d'autres disciplines des concepts, des méthodes, des outils ; les emprunts se faisant régulièrement des sciences formelles (mathématiques, physique) vers les sciences naturelles et humaines⁵. Ces emprunts supposent nécessairement des adaptations et des ajustements afin que ces éléments exogènes puissent s'adapter aux données et aux questions de recherche de la discipline importatrice. Néanmoins, il s'agit d'essayer de comprendre comment un programme de recherche dans une discipline donnée (la théorie des graphes en topologie⁶) impacte et est appropriée jusqu'à créer un programme de recherche innovant dans une discipline autre. Il s'agit dans cet article de la géographie mais la méthodologie employée me paraît pouvoir être transposée à d'autres disciplines. Il s'agit également d'éviter tout présentisme : ce que nous appelons aujourd'hui en France analyse de réseau ou théorie des graphes ne saurait être considéré comme le point de référence le plus pertinent pour évaluer les emprunts et adaptations disciplinaires effectuées il y a plus de 60 ans aux États-Unis.

2. Analyses de réseau et théorie des graphes, des constructions contemporaines ?

Si l'on consulte les manuels disponibles dans les différentes disciplines, et nous considérons comme Thomas Kuhn que le rôle des manuels est essentiel dans la formation des identités disciplinaires, le constat est unanime : l'analyse de réseau est issue de la théorie des graphes. Le physicien Mark Newman écrit ainsi dans l'introduction du chapitre 6 *Mathematics of Networks* : « In this chapter, we introduce the basic theoretical tools used to describe and analyze networks, most of which come from graph theory, the branch of mathematics that deals with networks.⁷ » (Newman, 2010, p. 109). Dans leur manuel destiné aux historiens et historiennes, Jacques Cellier et Martine Cocaud indiquent qu'en « 1736, le mathématicien suisse Léonard Euler [...] fonde par là une nouvelle branche des mathématiques la « Théorie des graphes » [...]. Cette théorie fournit le socle mathématique sur lequel s'appuie l'analyse des réseaux » (Cellier et Cocaud, 2012, p. 349). Les géographes Denise Pumain et Thérèse Saint-Julien précisent que la « description globale d'un réseau peut se faire au moyen de mesures tirées de la théorie des graphes » (Pumain et Saint-Julien, 1997, p. 94). Et l'auteur de ces lignes écrivait il y a quelques années « l'analyse de réseau désigne un ensemble de méthodes, de notions et de concepts fondés sur la théorie des graphes pour étudier un phénomène relationnel donné » (Beauguitte, 2016, p. 9). On pourrait multiplier les exemples

du milieu des années 1960 à nos jours et dans toutes les disciplines ayant développé un programme de recherche d'analyse de réseau.

L'une des hypothèses de cet article est qu'il s'agit d'une construction *a posteriori* et que ces programmes de recherche se sont pour la plupart développés en même temps que la théorie des graphes. Si les manuels de théorie des graphes, quel que soit le niveau du lectorat ciblé, évoquent tous Euler et le problème des ponts de Königsberg, il paraît douteux en termes d'histoire des sciences de considérer qu'un article isolé paru en 1736 suffise à lui seul à créer un programme de recherche. Le fait qu'Euler crée au XVIII^e siècle un objet composé de points et de lignes n'a pas de conséquence scientifique notable avant les années 1930⁸ et les problèmes ancêtres de la future théorie des graphes (théorème des quatre couleurs, dilemme du voyageur de commerce) appartiennent alors à la catégorie des curiosités mathématiques. Le premier manuel de théorie des graphes paraît en allemand à Leipzig en 1936 (Dénes König, 1936, *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen*) mais, étant donné le contexte européen à cette date, sa diffusion est très modeste ; John Scott indique que « *like many works published in Germany in the 1930s, it had little immediate impact on the wider intellectual world*⁹ » (Scott, 2000, p. 12). L'ouvrage est réédité à New York en 1950 mais non traduit avant 1990. Dans l'avant-propos de cette traduction, le mathématicien Willam T. Tutte rappelle que, dans les années 1930, la théorie des graphes est considérée comme une « *so-called science of trivial and amusing problems for children* », voire comme « *the slums of topology*¹⁰ » (Tutte, 1990, p. 1). Et Tibor Gallai, mathématicien formé par König, précise dans la postface de cette même traduction que « *the impact of this book was really felt only in the postwar years* »¹¹ (1990, p. 426).

Les premiers manuels de théorie des graphes en langue anglaise datent de 1962 seulement¹², il s'agit de la traduction de l'ouvrage de Claude Berge, *La théorie des graphes et ses applications*, paru à Paris chez Dunod en 1958. Deux manuels dus à des mathématiciens américains paraissent cette même année : *Graph Theory* d'Oysten Ore et *The Theory of Finite Graphs* de Frank Harary et Robert Norman. Il existait certes des articles traitant de théorie des graphes dans des revues de mathématiques avant cette date¹³ (voir notamment les travaux de Whitney, de Tutte ou d'Erdős, ce dernier étant également un élève de König¹⁴) mais ils n'ont eu semble-t-il aucun impact sur les disciplines autres. Les travaux de sociométrie des années 1940 s'appuient sur le seul calcul matriciel ; les travaux de recherche opérationnelle relatifs aux flots dans les réseaux des années 1950 s'appuient sur la programmation linéaire ; la théorie des graphes ne sera intégrée dans ces travaux qu'à la fin des années 1950 (voir le manuel des mathématiciens Ford et Fulkerson paru également en 1962). Dans les années qui suivent la parution de ces différents manuels, plusieurs manuels d'analyse de réseau appliquée à différentes disciplines paraissent aux États-Unis et l'on se contentera de citer celui de l'économiste Guiseppe Avondo-Bodino (1962), du psychologue Claude Flament (ouvrage écrit en français et traduit en anglais, publié en France en 1968) ou du trio composé de deux mathématiciens et d'un psychologue (Harary *et al.*, 1965). Néanmoins, certains ouvrages titrés « *Network analysis in ...* » parus après 1960 ne contiennent aucune référence à la théorie des graphes et s'inspirent d'autres programmes de recherche (étude de management, Battersby, 1964 ; étude des réseaux de communication, Beneš 1965).

Le tableau 1 recense les occurrences de différentes expressions (« *graph theory* », « *network analysis* », « *network theory* », « *flow theory* ») dans la base de données *JSTOR Data for Research* entre 1929 et 1969. Il s'agit d'indicateurs à commenter avec précaution pour deux raisons principales : un certain nombre de faux positifs sont susceptibles d'apparaître (si une phrase se termine par *network* et que la suivante commence par *analysis*, cela renvoie un résultat

positif à la requête) et surtout un examen plus poussé tant des cooccurrences de termes (un même article peut comprendre différentes expressions) que des disciplines et des revues concernées permettrait d'affiner l'analyse. De telles investigations sont prévues mais n'ont pas pu encore être réalisées à ce jour. Néanmoins, ces indicateurs montrent l'essor très net du terme « *graph theory* » à partir du milieu des années 1950. La « *network analysis* » est plus ancienne (années 1940) et son développement est notable à partir du milieu des années 1960, quand les programmes de recherche en analyse de réseau se banalisent dans différentes disciplines. « *Network theory* » et « *Flow theory* » montrent une progression faible, relativement similaire, qui est sans doute lié à l'élargissement du corpus de revues dans la base de données *JSTOR* lors de la période considérée (cette dernière hypothèse n'a pas encore été validée par l'auteur).

Tableau 1 : Graph, Network, Flow dans JSTOR Data for Research

| | « <i>Graph theory</i> » | « <i>Network Analysis</i> » | « <i>Network theory</i> » | « <i>Flow theory</i> » |
|-----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1929-1939 | 0 | 1 | 6 | 18 |
| 1940-1944 | 1 | 1 | 3 | 9 |
| 1945-1949 | 0 | 19 | 6 | 6 |
| 1950-1954 | 12 | 18 | 11 | 9 |
| 1955-1959 | 39 | 12 | 25 | 19 |
| 1960-1964 | 162 | 78 | 41 | 55 |
| 1965-1969 | 320 | 209 | 81 | 95 |

Données collectées en décembre 2020. Les effectifs indiqués doivent être considérés comme des ordres de grandeur : la même requête sur la même période avec les mêmes critères donne des résultats variables à quelques unités près selon les jours.

Le caractère tardif de la théorie des graphes est admis par Claude Berge lui-même qui indiquait en 1970 dans l'avant-propos de *Graphes et hypergraphes* : « La Théorie des graphes a eu un développement bien étrange ; d'abord apparue dans le magasin des curiosités mathématiques (« les ponts de Königsberg »), puis devenue un outil pour l'étude des circuits électroniques (Kirchhof), elle a été utilisée par la chimie, la psychosociologie et l'économie **avant même d'être constituée** » (c'est moi qui souligne). L'exemple le plus étudié et le plus connu est sans doute celui de la *Social Network Analysis (SNA)* ; l'une de ses sources d'inspiration principale est selon plusieurs auteurs la sociométrie de Jacob Moreno et d'Helen Hall Jennings développée dans les années 1930 et n'ayant aucun lien avec la théorie des graphes. Pourtant, comme l'indique le sociologue Linton Freeman, cette approche « *was based on structural intuitions, it involved the collection of systematic empirical data, graphic imagery was an integral part of its tools and it embodied an explicit mathematical model*¹⁵ » (Freeman, 2004, p. 39). On trouve d'ailleurs dans la revue fondée par Moreno en 1937, *Sociometry*, de nombreux articles proposant des mesures de centralité des acteurs, des méthodes de détection des cliques fondées sur du calcul matriciel, des mesures d'homophilie, questions de recherche qui seront reprises par la *SNA* du physicien et sociologue Harrison White à Harvard dans les années 1960.

[3. Analyse des réseaux d'infrastructures : la création d'un programme de recherche hybride](#)

L'analyse de réseau dans une discipline donnée suppose au niveau théorique des objets qui seront définis comme des réseaux (réseaux sociaux en sociologie, réseaux trophiques en

écologie, réseaux d'infrastructures ou de villes en géographie, etc.), des concepts et des méthodes permettant de répondre à des questions de recherche spécifiques (accessibilités des lieux, centralités des personnes, équilibre des écosystèmes) et, dans la mesure où du calcul matriciel est quasi indispensable, des outils logiciels permettant de mener à bien ces questions. Au niveau organisationnel, cela suppose également des personnes motrices et des débouchés académiques (postes, revues). L'histoire de la géographie quantitative est fort documentée et insiste à juste titre sur le rôle moteur de William Garrison à l'Université de Washington¹⁶ - Torsten Hagërstrand a certes joué un rôle pionnier en Suède mais ses travaux n'auront d'impact qu'après leur diffusion *via* les universitaires anglophones (Duncan, 1974). Cet universitaire a su s'entourer d'un ensemble d'étudiants (le masculin s'impose, aucune femme n'est présente dans les premiers temps de cette géographie quantitative) talentueux dont nombreux poseront les fondations de ce programme de recherche. Sans prétendre à l'exhaustivité, on peut notamment citer Brian Berry, William Bunge, Duane Marble, John Nystuen ou Waldo Tobler. William Garrison joue également un rôle essentiel dans la création de l'analyse de réseau *via* différents rapports de recherche financés par l'armée américaine - ce qui est très courant dans le contexte de la guerre froide¹⁷ -, des ouvrages collectifs et un article fondateur en 1960 (Garrison, 1960¹⁸). L'année suivante, deux de ses élèves, Nystuen et Dacey, publient le premier article de géographie contenant l'expression « *graph theory* » dans le titre (Nystuen et Dacey, 1961). Ces deux articles auront une influence importante, notamment parce qu'ils seront repris dans l'un des *textbooks* majeurs de la géographie quantitative américaine (Berry et Marble, 1968). Un troisième moment clé pour la création de l'analyse de réseau en géographie est la parution en 1963 de la thèse de K. Kansky consacrée à l'analyse des réseaux d'infrastructures, thèse dirigée par William Garrison et issue d'un contrat avec l'armée de terre américaine.

L'article de Garrison, publié dans une toute nouvelle revue disposée à publier des travaux de géographie quantitative, affirme dès la première page que l'« *Interstate System is treated as a graph, and the usefulness of concepts in the theory of graphs is examined* »¹⁹. Il précise dans la deuxième partie de l'article que le réseau autoroutier est considéré comme un graphe planaire et « ordinaire » (*ordinary*²⁰), soit non orienté et sans lien multiple. L'auteur emprunte à la théorie des graphes le terme de chemin (*path*) caractérisé par sa longueur et sa distance. Les mesures proposées sont l'*associated number* (chemin maximal entre un sommet et tout autre sommet du graphe), la place centrale (*central place*, soit le sommet pour lequel l'*associated number* est minimal) et le diamètre. Différents mathématiciens (Berge, Cartwright, Harary, König) sont cités à l'appui de ce développement. Les mesures proposées ensuite sont issues de l'étude des réseaux de communication : mesures de connectivité du réseau (Prihar, 1956), mesures de dispersion et d'accessibilité (Shimbel, 1953²¹ ; Katz, 1953²²). Si l'ingénieur des télécommunications Prihar s'inspire de la théorie des graphes, les mathématiciens Katz et Shimbel mobilisent le calcul matriciel mais ne font aucunement référence à cette dernière - le terme *graph* n'apparaît pas une seule fois dans les deux articles.

Nystuen et Dacey, un an plus tard et dans la même revue, publient leur article *A graph theory interpretation of nodal regions*. Leur objectif est le suivant : « *pertinent geographic and graph theoretic concepts are discussed and are then used as a basis for deriving the method of isolating nodal regions* »²³. Leurs données sont sensiblement différentes ; ils ne partent pas d'un réseau d'infrastructures mais d'une matrice de flux téléphoniques entre villes, ces dernières sont considérées comme des points et les flux comme des liens valués entre ces points. Différents termes sont empruntés à la théorie des graphes (*adjacent point, directed graph, path, degree, component*). Ils présentent ensuite la matrice d'adjacence correspondant au graphe avant de proposer une méthode originale : un lieu *i* est dominé par *j* s'il envoie son flux le plus important vers *j* et si *j* reçoit un volume supérieur à *i*. Ces deux conditions permettent une partition des

sommets en dominant, intermédiaire, dominé et isolé ; cela permet de transformer le graphe quasi complet (et non planaire) de départ en un arbre ou une forêt. Si le vocabulaire est bien issu de la théorie des graphes (König, Berge, Harary sont cités), la méthode proposée est une création des auteurs. La manière dont ils créent des catégories de sommets est liée à une question classique de géographie régionale et urbaine - déterminer la hiérarchie et les zones d'influence d'un système urbain – et n'a pas de lien avec les méthodes et mesures issues de la théorie des graphes.

La thèse de Kansky propose davantage de mesures et de méthodes pour analyser des réseaux d'infrastructures pouvant être modélisés par des graphes planaires (Kansky, 1963). Les mesures qui ont eu semble-t-il la postérité la plus grande, notamment dans la géographie francophone²⁴, sont une série d'indicateurs faciles à calculer car basés sur trois mesures simples : le nombre de sommets (ordre), le nombre de liens (taille) et le nombre de composantes connexes. Même en l'absence d'ordinateurs – vite indispensables pour du calcul matriciel – il était possible de calculer ces indicateurs nommés par des lettres grecques (Beauguitte, 2020). La majorité des indices proposés sont des créations de Kansky, on peut citer par exemple les indices beta et gamma qui se calculent de la façon suivante : soit un réseau avec v sommets et e liens

$\beta = e/v$ et $\gamma = e/3(v - 2)$ pour un graphe planaire.

Ces indicateurs ne constituent qu'une petite partie de la thèse qui propose également de tester les relations entre développement économique et qualité des infrastructures (question de recherche souvent explorée à cette période) et des simulations de trafic sur les réseaux. Une fois encore, si la terminologie est bien issue de la théorie des graphes, et essentiellement de l'ouvrage de Claude Berge traduit un an auparavant, les mesures proposées, à l'exception du nombre cyclomatique rebaptisé indice mu²⁵, sont des créations adaptées aux questions de recherche de l'auteur.

Si les travaux portant sur les réseaux de communication, et notamment ceux de Shimbel, sont mobilisés en géographie des transports, c'est qu'ils posent des questions thématiquement proches des préoccupations des géographes (efficacité des réseaux, accessibilité) et qu'ils concernent également des réseaux techniques (liaisons entre émetteurs). Inversement, ces géographes ne s'inspirent pas du tout des travaux d'optimisation linéaire et notamment des travaux d'ingénierie des flux (Ford et Fulkerson, 1962). Garrison les connaît et les cite au début de son article en louant leur intérêt théorique mais ne les mobilise pas. Le lien avec les modèles gravitaires de la *Social Physics* développé depuis les années 1940 n'est pas non plus fait alors que les données de Nystuen et Dacey s'y seraient volontiers prêtées. Il faudra attendre la mise en manuel²⁶ de ce programme de recherche pour que ces différentes approches soient réunies en un ensemble cohérent sous le label de *Geography of Transportation* (Taaffe et Gauthier, 1973²⁷). La façon dont les travaux pionniers évoqués à l'instant ont été retravaillés pour faciliter cette mise en manuels nécessitera des investigations supplémentaires.

Si les méthodes ont évolué, notamment suite aux travaux des physiciens sur les réseaux depuis la fin des années 1990, un certain nombre de choix méthodologiques et conceptuels restent prégnants. Dès le départ, les réseaux considérés sont soit des infrastructures techniques (réseau routier ou ferroviaire) soit des unités territoriales agrégées (villes). Une récente méta-analyse portant sur plus de 300 articles de géographes mobilisant l'analyse de réseau et parus entre 1990 et 2018 montre que ce choix de travailler sur des unités agrégées reste dominant aujourd'hui encore (Glückler et Panitz, 2021). Les questions d'efficacité et de vulnérabilité des réseaux techniques restent aujourd'hui encore des problématiques majeures (Lhomme, 2012) et les

régionalisations basées sur des flux entre lieux forment toujours un courant actif dans la géographie contemporaine (Ducruet et Notteboom, 2012 ; Maisonobe, 2015).

Conclusion

Cet article s'inscrit dans un travail au long court consacré à la création de l'analyse de réseau en géographie et un certain nombre de pistes n'ont pas encore été suffisamment explorées pour valider avec certitude les hypothèses présentées en introduction. Néanmoins, tant la chronologie des parutions que les témoignages des différents chercheurs indiquent que la théorie des graphes n'existe guère sous ce nom avant les années 1950 (réédition à New-York du manuel de König en allemand) voire le tournant des années 1960 (publication en France puis traduction en anglais du manuel de Claude Berge). Inversement, différents programmes de recherche (réseaux électriques, recherche opérationnelle et optimisation linéaire, sociométrie, réseaux de communication) préexistent, mobilisent algèbre linéaire et/ou calcul matriciel, s'intéressent aux centralités des acteurs, aux cliques, aux plus courts chemins, à l'efficacité des réseaux, etc. Tous ces programmes incorporeront *a posteriori* le vocabulaire basique de la théorie des graphes (nœud, lien, chemin, diamètre, soit une dizaine de termes tout au plus).

L'exemple des premiers travaux de géographes nord-américains mobilisant la théorie des graphes montre, comme il est attendu en histoire des sciences, que les outils franchissent les barrières disciplinaires en étant transformés et adaptés. Certains termes de vocabulaire sont repris, certaines mesures et définitions également, mais des emprunts sont faits à d'autres disciplines (étude des réseaux de communication dans ce cas) et surtout, une part importante de création permet d'ajuster l'outil importé aux questions de recherche disciplinaire et aux données étudiées. Si l'étude des réseaux de communications est largement reprise par les géographes, c'est en raison semble-t-il de la grande proximité tant des objets que des questions de recherche (efficacité et vulnérabilité d'un réseau d'infrastructures); inversement, les travaux sociométriques portant sur des relations inter-individuelles sont peu repris.

Le caractère hybride et en grande partie autonome de la création de l'analyse de réseau en géographie concerne sans doute toutes les traditions d'analyse de réseau, ce qui expliquerait qu'en quelques années, la distance conceptuelle, méthodologique et terminologique entre elles soit devenue trop grande pour permettre un dialogue fructueux. Un exemple caricatural est celui d'un indicateur simple à calculer : la proportion de liens présents par rapport au nombre de liens possibles. Cet indicateur est appelé *density* dans une poignée d'articles (notamment Jacobs, 1959 et Cartwright et Harary, 1961) mais il est absent des manuels de Berge (1958) et de Harary (1969²⁸). L'indicateur est parlant, simple à calculer (pour un graphe simple non orienté de v sommets et e liens, la formule est $2e / v(v-1)$) et sera « inventé » en géographie sous le nom d'indice gamma (cf *supra*), en sociologie sous le nom de densité²⁹ et en écologie sous le nom de *connectance* (Gardner et Ashby, 1970). Mais les géographes travaillant sur les réseaux d'infrastructure appellent *density* le ratio entre la longueur des voies et le territoire étudié. Qu'un même indicateur porte trois noms différents dans trois disciplines ou qu'un même terme désigne deux indicateurs différents ne pouvaient guère faciliter les circulations interdisciplinaires. Il faudra attendre l'arrivée des physiciens à la fin des années 1990 pour bousculer ces différents programmes de recherche, relativement étanches les uns aux autres, pour voir émerger de nouveaux questionnements et de nouvelles méthodes que les différentes disciplines s'approprièrent ensuite de manière variable et suivant des temporalités spécifiques.

Bibliographie

AVONDO-BODINO Giuseppe, 1962, *Economic Applications of the Theory of Graphs*, New York, Gordon and Breach, Science Publishers.

BARNES Trevor J., 2001, « Lives lived and lives told: biographies of geography's quantitative revolution », *Environment and Planning D: Society and Space*, n°19, p. 409-29.

BARNES Trevor J., FARISH Matthew, 2006, « Between Regions: Science, Militarism, and American Geography from World War to Cold War », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 96, n°4, p. 807-26.

BATTERSBY Albert, 1964, *Network Analysis for Planning and Scheduling*, Londres, MacMillan & Co.

BEAUGUITTE Laurent, 2016, « L'analyse de réseaux en sciences sociales et en histoire : vocabulaire, principes et limites », in LETRICOT Rosemonde, CUXAC Mario, UZCATEGUI Maria, CAVALETTO Andrea (dir.), *Le réseau. Usages d'une notion polysémique en sciences humaines et sociales*, Louvain-la-Neuve, Presses Universitaires de Louvain, p. 9-24.

BEAUGUITTE Laurent, 2020, « Indices Kansky », *Hypergeo*, [En ligne, consulté le 08 juin 2021] URL : <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article761> .

BEAUGUITTE Laurent, BEAUGUITTE Pierre, GOURDON Paul, 2021, « William L. Garrison, 1960, Connectivity of the Interstate Highway System. Version bilingue et commentée », *Groupe fmr*, [En ligne] URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03149573v1> .

BENES V. E., 1965, *Mathematical Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic*, New York, Londres, Academic Press.

BERRY Brian J.L., 1993, « Geography's Quantitative Revolution: Initial Conditions, 1954-1960. A Personal Memoir », *Urban Geography*, vol. 14, no5, p. 434-41.

BERRY Brian J.L., MARBLE Duane F., 1968, *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.

BIGGS , Norman L., LLOYD Keith E., WILSON Robert E., 1978, *Graph Theory 1736-1936* , Oxford, Clarendon Press.

BURTON Ian, 1963, « The Quantitative Revolution and Theoretical Geography », *Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, vol. 7, no4, p. 151-62.

CARTWRIGHT Dorwin, HARARY Frank, 1961, « The Number of Lines in a Digraph of Each Connectedness Category », *SIAM Review*, vol. 3, no4, p. 309-14.

CELLIER Jacques, COCAUD Martine, 2012, *Le traitement des données en Histoire et Sciences Sociales. Méthodes et outils*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes.

DUCRUET César, NOTTEBOOM Theo, 2012, « The worldwide maritime network of container shipping : spatial structure and regional dynamics », *Global networks*, vol. 12, n°3, p. 395-423.

DUNCAN Simon S., 1974, « The Isolation of Scientific Discovery: Indifference and Resistance to a New Idea », *Science Studies* , vol. 4, p. 109-34.

DUCRUET César, BEAUGUITTE Laurent, 2014, « Spatial science and network science: review and outcomes of a complex relationship. » *Networks and Spatial Economics* , vol. 14, n°3, p. 297-316.

FLAMENT Claude, 1963, *Applications of Graph Theory to Group Structure*, Englewood Cliffs (NJ), Prentice-Hall (traduit et publié en France en 1968 sous le titre *Théorie des graphes et structures sociales*, Paris, Gauthier-Villars).

FREEMAN Linton C., 2004, *The Development of Social Network Analysis. A Study in the Sociology of Science*, Vancouver, Empirical Press.

FORD Jr Lester Randolph et FULKERSON Delbert Ray, 1962, *Flows in Networks*, Princeton (NJ), Princeton University Press.

GALLAI Tibor, 1990, « Denes König: A Biographical Sketch », in KÖNIG Denes, *Theory of Finite and Infinite Graphs* , Boston, Birkhäuser, p. 422-26.

GARDNER Mark R., ASHBY W. Ross, 1970, « Connectance of Large Dynamic (Cybernetic) Systems: Critical Values for Stability », *Nature*, vol. 228, no5273, p. 784.

GARRISSON William L., 1960, « Connectivity of the Interstate Highway System », *Papers and Proceedings of the Regional Science Association*, vol. 6, p. 121-37.

GLÜCKLER Johannes, PANITZ Robert, 2021, Unleashing the potential of relational research: A meta-analysis of network studies in human geography, *Progress in Human Geography*.

HAGGETT Peter, CHORLEY Richard J., 1969, *Network Analysis in Geography*, Londres, Edward Arnold.

HARARY Frank, NORMAN Robert Z., 1962, *The Theory of Finite Graphs*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co.

HARARY Frank, NORMAN Robert Z., CARTWRIGHT Dorwin, 1965, *Structural Models: An Introduction to the Theory of Directed Graphs*, New York, John Wiley & Sons.

HARARY Frank, 1969, *Graph Theory*, Reading, Addison-Wesley.

HOUNSHELL David A. , 2000, « The Medium Is the Message, or How Context Matters: The RAND Corporation Builds an Economics of Innovation, 1946-1962 », in HUGUES Agatha C., HUGUES Thomas P. (dir.), *Systems, Experts, and Computers. The Systems Approach in Management and Engineering, World War II and After*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, p. 255-310.

JACOBS Irwin Mark, 1959, *Connectivity in Probabilistic Graphs. Technical Report*, Cambridge, MIT.

KANSKY Karel, 1963, *Structure of Transportation Networks : Relationships between Network Geometry and Regional Characteristics*, Chicago, University of Chicago Press.

KATZ Leo, 1953, « A New Status Index Derived from Sociometric Analysis », *Psychometrika*, vol. 18, no1, p. 39-43.

LAHIRE Bernard, 2012, *Monde pluriel. Penser l'unité des sciences sociales*, Paris, Seuil.

LHOMME Serge, 2012, *Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain- Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine*, Thèse de géographie, Université Paris-Diderot-Paris VII.

LI VIGNI Fabrizio, 2018, *Les systèmes complexes et la digitalisation des sciences. Histoire et sociologie des instituts de la complexité aux États-Unis et en France*, Thèse de Sociologie, Paris, EHESS.

NEWMAN Mark E.J., 2010, *Networks. An Introduction*, Oxford, Oxford University Press.

NYSTUEN John D., DACEY Michael F., 1961, « A graph theory interpretation of nodal regions », *Papers of the Regional Science Association*, vol. 7, no1, p. 29-42.

MAISONOBE Marion, 20015, *Étudier la géographie des activités et des collectifs scientifiques dans le monde : de la croissance du système de production contemporain aux dynamiques d'une spécialité, la réparation de l'ADN*, Thèse de Géographie, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II.

ORE Oystein, 1962, *Theory of Graphs*, Providence, Rhode Island, American Mathematical Society.

PUMAIN Denise, SAINT-JULIEN Thérèse, 1997, *L'analyse spatiale. 1, Localisations dans l'espace*, Paris, Armand Colin.

SAPOLSKY Harvey M., 2014, *Science and the Navy: The History of the Office of Naval Research*, Princeton (NJ), Princeton University Press.

SCOTT John, 2000, *Social Network Analysis. A Handbook*, Londres, SAGE.

SESHU Sundaram, REED Myril B., 1961, *Linear Graphs and Electrical Networks*, Reading (Mass), Addison-Welsey.

SHIMBEL Alfonso, 1953, « Structural Parameters of Communication Networks », *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 15, no4, p. 501-7.

TUTTE William T., 1990, « Commentary » in KÖNIG Denes, *Theory of Finite and Infinite Graphs*, Boston, Birkhäuser, p. 1-44.

ULINES MOULINES C., 2006, *La philosophie des sciences. L'invention d'une discipline (fin XIXe - début XXIe siècle)*, Paris, Éditions rue d'Ulm.

Notes

1 Soit une ville traversée par un fleuve avec une île au milieu et sept ponts entre les deux berges et l'île ; est-il possible de trouver un chemin permettant d'emprunter chacun des ponts une fois et une seule ? Euler prouve que non après avoir symbolisé les berges et l'île par des points et les ponts par des lignes ; le terme de graphe n'est pas utilisé par l'auteur.

2 Cet objectif est rarement atteint, un certain nombre de documents échappant à la collecte. En ce qui concerne les manuels par exemple, il est souvent difficile de pouvoir se procurer les différentes éditions.

3 Dans la discipline et la période étudiées ici, le masculin s'impose ; les rares femmes présentes le sont au titre de secrétaires, de dactylos et/ou d'épouses.

4 <https://www.jstor.org/df/> (accédé le 10 décembre 2020). Je remercie chaleureusement Guillaume Cabanac qui a attiré mon attention sur cette ressource que j'ignorais.

5 Que l'on songe aux tentatives faites pour importer les modèles gravitaires, les fractales ou la théorie du chaos dans différentes disciplines sociales au cours du XXe siècle.

6 La théorie des graphes est en partie issue de la topologie mais dérive également de la théorie des ensembles, de l'algèbre linéaire et du calcul matriciel (cf. Berge, 1958).

7 « Dans ce chapitre, nous introduisons les outils théoriques basiques utilisés pour décrire et analyser les réseaux, la plupart venant de la théorie des graphes, la branche des mathématiques s'occupant des réseaux. » (ma traduction, comme pour les traductions suivantes).

8 À l'exception de la théorie des réseaux électriques élaborée au XIXe siècle par le physicien allemand Gustav Kirchhoff.

9 « Comme de nombreux travaux publiés en Allemagne dans les années 1930, il a eu un faible impact sur le monde intellectuel dans son ensemble ».

10 Cette « prétendue science de problèmes triviaux et amusants pour enfants » constitue « les bas-fonds de la topologie ».

11 « L'impact de cet ouvrage ne s'est fait sentir que dans l'après-guerre ».

12 Si les 5 premiers chapitres de l'ouvrage de Seshu et Reed (1961) sont exclusivement consacrés à la théorie des graphes *stricto sensu*, le reste de l'ouvrage concerne uniquement l'étude des réseaux électriques dans la lignée des travaux de Kirchhoff.

13 On trouve une liste à peu près exhaustive de ces articles dans l'ouvrage de Biggs *et al.*, 1976, pp. 223-234.

14 Erdős évoque ces cours dans le *Welcome* écrit pour le premier numéro du *Journal of Graph Theory*, revue créée en 1977 seulement (https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Konig_Denes/, consulté le 18/12/2020).

[15](#) La sociométrie « était basée sur des intuitions structurales, elle supposait la collecte de données empiriques systématiques, l'imagerie graphique était un outil à part entière et elle incorporait un modèle mathématique explicite ». Ces quatre critères définissent selon Freeman la *SNA* (Freeman, 2004, p. 3).

[16](#) Le sujet est abondamment documenté et la poignée d'articles cités ici ne saurait épuiser la bibliographie : pour une analyse contemporaine, voir Burton, 1963 ; pour un témoignage *a posteriori*, voir Berry, 1993 ; le rôle de Garrison est notamment mis en évidence par Barnes, 2001 ; les liens entre géographie quantitative, guerre froide et armée sont analysés dans Barnes et Farish, 2006.

[17](#) Cet aspect n'est pas développé ici par manque de place mais tant l'armée de terre, notamment via la *Rand Corporation*, que l'armée de mer via l'*Office of Naval Research (ONR)* ont joué un rôle essentiel dans le développement de la théorie des graphes, de l'analyse de réseau et de l'optimisation linéaire. Voir notamment Hounshell (2000) pour la *Rand Corporation* et Salposky (2014) pour l'*ONR*.

[18](#) Une version bilingue et commentée de cet article est disponible en ligne (Beauguitte *et al.*, 2021).

[19](#) L'« Interstate system est considéré comme un graphe, et l'utilité de concepts de la théorie des graphes est examiné ».

[20](#) On parlerait aujourd'hui de graphe simple.

[21](#) Article issu d'un financement de l'*US Air Force*.

[22](#) Katz indique que ses travaux ont été financés par l'*Office of Naval Research*.

[23](#) « Les concepts géographiquement pertinents et les concepts de la théorie des graphes sont discutés puis utilisés comme base pour en tirer une méthode d'identification des régions nodales »

[24](#) Cette hypothèse est notamment fondée sur le fait que le chapitre présentant ces indicateurs ait été réédité dans la revue *Flux* créée par le groupement de recherche Réseaux en 1989.

[25](#) Soit un graphe avec e liens, v sommets et p composantes connexes, $\mu = e - v + p$. L'indicateur est également appelé « nullity », et « first Betti number » (Seshu et Reed, 1961, p. 27).

[26](#) L'ouvrage de Haggett et Chorley paru en 1969 *Network Analysis in Geography* est davantage une synthèse dense et en lien avec l'actualité disciplinaire immédiate de l'ensemble des approches réticulaires en géographie humaine et physique qu'un manuel à proprement parler ; le nombre de travaux exploratoires cités est élevé et peu de méthodes paraissent stabilisées dans le discours des auteurs.

[27](#) Je n'ai pas encore pu me procurer la première édition datée de 1969.

[28](#) Aujourd'hui encore les manuels de *Graph theory* destinés aux étudiant·e·s en mathématiques évoquent les graphes vides (aucun lien), les graphes complets (tous les liens possibles sont

présents) mais non le rapport entre nombre de liens présents et nombre de liens possibles. Inversement, à ma connaissance, toutes les disciplines ayant un programme de recherche d'analyse de réseau calculent cet indicateur.

[29](#) Lui attribuer un auteur et une date unique est délicat, l'indice étant proposé par différents auteurs entre 1959 et 1961 puis repris la décennie suivante dans la *SNA* de Harrison White.