

Analyse de la représentation en grille du territoire pour l'étude de l'évolution du chemin de fer

AUTEURS

Christophe MIMEUR, François QUEYROI

RÉSUMÉ

Les interactions entre transport et territoire occupent une place importante dans la littérature scientifique. L'impact d'une nouvelle infrastructure en termes économiques reste l'axe d'analyse privilégié (Kasraian *et al.*, 2016). Nous nous intéressons ici au rôle d'une situation démographique préexistante (Pumain, 1982) dans l'agencement et la construction cumulative du réseau. Dans ce sens, l'utilisation d'algorithmes de construction de réseaux de transport est une approche pertinente. Toutefois, ces méthodes requièrent non seulement une représentation « en grille » du territoire en entrée mais contiennent également des hypothèses implicites sur la mobilité. Nous discutons ici de la construction de cette grille et de l'influence des choix de représentation sur la modélisation. Nous montrons d'abord que l'approche par triangulation permet un arbitrage correct entre précision et généralisation. Nous montrons ensuite que les choix d'échelle sur la grille peuvent significativement influencer les résultats de modélisation.

MOTS CLÉS

Réseau, territoire, modèle, graphe, géohistoire

ABSTRACT

Interactions between transportation and territory are an important topic in scientific literature. The economic impact of a new infrastructure remains the most common subject of investigation (Kasraian *et al.*, 2016). We focus here on the role of an existing demographic distribution in the design of transportation networks. The use of transportation network algorithms is a relevant approach in this context. However, these methods require as input a grid-like representation of the territory. They also make implicit hypothesis on mobility. In this paper, we discuss the construction of this grid and the effect of the choices made in order to define it. We first show that a grid based on triangulation achieves a good balance between precision and sparsity. Then we underline that the scale chosen when constructing the grid may have a significant impact on modelling results.

KEYWORDS

Network, Territory, Modelling, Graph theory, Historical Geography

INTRODUCTION

L'étude des relations entre un système de transport et un système de peuplement est davantage guidée dans la littérature dans le sens unique d'une relation de cause à effet reliant l'ouverture d'une infrastructure à ses impacts sur les territoires qu'elle dessert. L'autre sens de la boucle d'interaction liant réseau et territoire est beaucoup moins étudié dans la littérature, ou du moins plus partiellement. Pour autant, les deux sens sont au cœur d'une controverse scientifique. Le premier sens classique est surtout le fait d'un effet structurant fortement ancré dans les milieux politiques, alors que l'on s'accorde à démontrer que ces effets sont très liés aux contextes spatiaux qui nuisent à toute tentative de généralisation (Mimeur *et al.*, 2017).

Le second souffre d'un manque d'investigation empirique et d'une production plus dormante à la fin du XX^e siècle.

Cette communication se place dans le contexte de l'étude des deux sens de l'interaction en se focalisant sur l'exemple du réseau ferroviaire français entre les XIX^e et XX^e siècles. On cherche à savoir comment, dans un premier temps, la croissance du réseau ferroviaire français a progressivement déformé la relativité des localisations sur le territoire national et comment, dans un second temps, le développement du réseau s'est dessiné « en fonction d'une hiérarchie de tailles et de dynamismes urbains qui préexistait à son installation » (Pumain, 1982). Notre démarche n'est donc pas tant de modéliser précisément l'évolution du réseau mais plutôt de comparer des simulations de réseaux se basant sur l'hypothèse précédente (en cherchant à maximiser l'accessibilité) avec les changements observés sur la période. Un enjeu est la critique de la communication politique autour des questions de transport (l'importance donnée à l'« accès au(x) territoire(s) »).

Nous nous intéressons ici à la définition d'une grille de représentation du territoire pour encoder l'évolution du réseau dans un contexte géo-historique en utilisant la base de données FRANcE. En effet, les deux temps de l'analyse doivent reposer sur la même représentation : elle doit à la fois refléter correctement la déformation des trajectoires et permettre la modélisation du réseau.

Ce besoin de représentation du territoire nous pousse à nous interroger sur les choix opérés pour définir cette grille. Quelles contraintes physiques et contextuelles doit-on intégrer ? Quelles contraintes de calcul s'imposent à nous dans la démarche de modélisation ? En quoi ces paramètres influent-ils sur la représentation initiale du territoire et les résultats de la simulation ?

1. LA TRIANGULATION : UNE GRILLE DE REPRÉSENTATION DU TERRITOIRE POUR LA RELATIVITÉ DES LOCALISATIONS DANS UN MULTIGRAPHE GÉOHISTORIQUE

Nos travaux de recherche nous ont conduits à définir la chute des temps de parcours comme un facteur potentiel de développement. Afin de rendre compte de cette évolution sur le temps long, la construction d'indicateurs d'accessibilité doit s'adjoindre un certain nombre de critères géohistoriques ; les mesures doivent :

- rendre compte des performances du réseau ;
- être adaptées au contexte qu'elles décrivent ;
- être techniquement réalisables ;
- être faciles à interpréter.

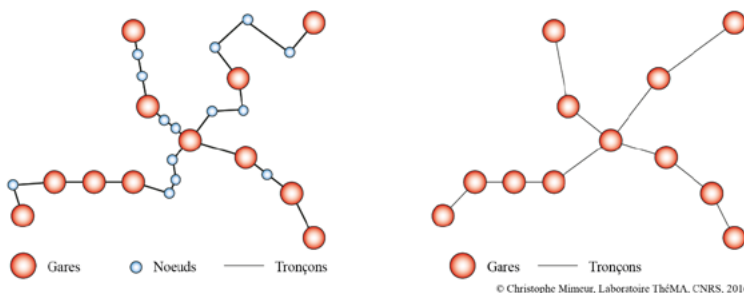
Ces critères font converger vers la théorie des graphes, comme « outil de modélisation de réalisations concrètes » (Xuong, 1992).

Dans la base de données FRANcE, le déploiement du réseau ferroviaire se traduit par un SIG comportant les 40 000 kilomètres de lignes construites en France entre 1830 et aujourd'hui, précisant chaque courbe et intersection de l'infrastructure. Chaque tronçon est décrit par sa date d'ouverture et éventuellement de fermeture, ainsi que par la vitesse moyenne de circulation définie à chaque décennie. Quelques 11 000 gares sont représentées en figurés ponctuels et comportent les mêmes informations temporelles. Notre approche privilégie une vision

potentielle de l'accessibilité plutôt que réelle, car les sources historiques ne nous permettent pas de connaître la fréquence de la desserte sur l'ensemble du réseau.

Le passage du SIG au graphe ferroviaire nécessite des adaptations : chaque nœud transcrit par le SIG n'est pas une gare mais le départ d'un tronçon. Or, l'accès au réseau est nécessairement discontinu : à la différence d'un réseau routier où un individu peut théoriquement entrer en tout point, à l'exception d'axes de type autoroutier, l'accès au réseau ferroviaire se fait exclusivement depuis une gare. L'obtention d'un graphe planaire, dans lequel chaque nœud est une gare et chaque lien un tronçon de gare à gare, s'effectue à partir d'un algorithme permettant d'obtenir un nouveau graphe, qui donne une « représentation fonctionnelle » (fig. 1). C'est ce type de graphe qui permet aussi d'effectuer des mesures directement issues de l'analyse de réseau, à même de traduire l'évolution du réseau ferroviaire, de ses capacités circulatoires et de ses propriétés générales.

Figure 1. La simplification du graphe : du SIG au graphe fonctionnel



Pour autant, de nombreuses contrées sont encore isolées du train et le cheminement vers la gare reste un segment de déplacement problématique. Celui-ci se fait dans un horizon qui demeure limité au XIX^e siècle, où la marche à pied reste dominante. Ces questionnements se sont souvent cantonnés à l'adoption d'une distance à vol d'oiseau de la gare. Nous recherchons ici à intégrer un nouveau segment temporel entre une commune initiale et la gare qu'il est le plus efficace de rejoindre. Il n'existe pas à notre connaissance de grille empirique et historique permettant de traduire cette réalité. Nous avons à arbitrer entre l'utilisation d'une base exhaustive, avec un décalage temporel non négligeable, et la construction d'une grille théorique. Nous supposons aussi que les contraintes topographiques sont à intégrer par la prise en compte du MNT BD ALTI¹, de sorte à pénaliser les temps de parcours à pied par la pente moyenne de chaque tronçon (fig. 2).

La première solution consiste ainsi à utiliser la base de données BD CARTO conçue par l'IGN, qui répertorie routes et chemins d'aujourd'hui. À condition d'ôter les liaisons de type autoroutière souvent construites *ex nihilo*, on pose l'hypothèse que chacun des autres chemins sont dans le pire des cas empruntables à pied. Cependant, les plusieurs millions de tronçons routiers rendent la résolution d'algorithme de plus court chemin très lourd.

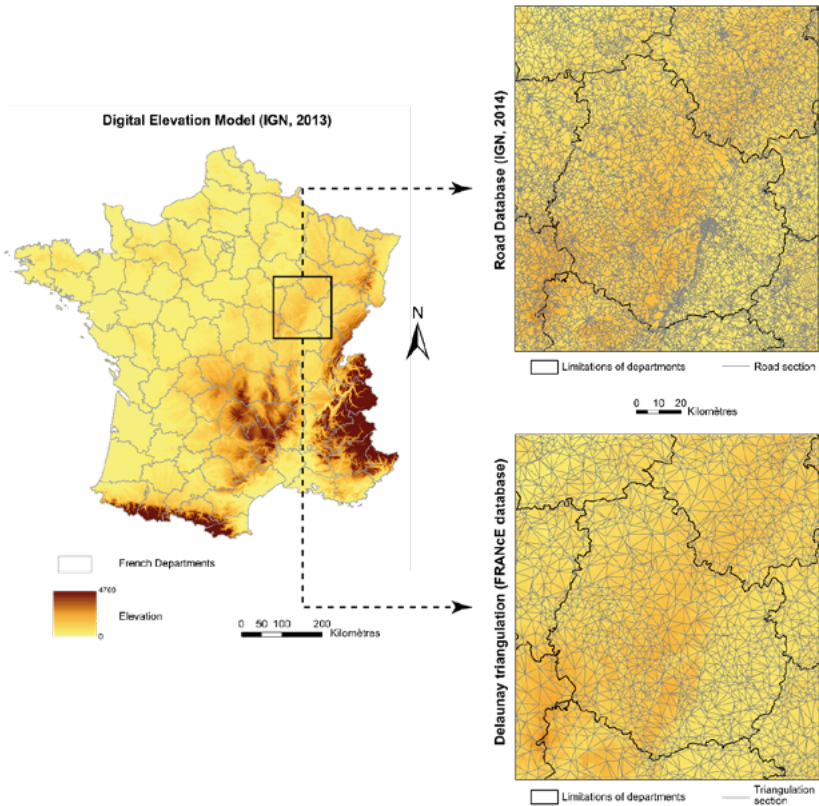
Une seconde solution théorique suppose d'appliquer une fonction de déplacement directement

1 Le modèle numérique de terrain BD ALTI est mise à disposition par l'IGN avec une résolution raster de 250 mètres.

sur le MNT, où la forme des chemins semble s'apparenter à des problématiques de bassins versants. Ici encore, les temps de calcul nécessaires au traitement d'une image raster restent très lourds.

Une troisième solution réside dans la construction d'un graphe théorique, capable de maximiser l'information entre deux communes et de minimiser l'information à l'échelle nationale, de manière à calculer des chemins sur l'ensemble du territoire. La triangulation de Delaunay (1934) permet une densité maximale de liens en optimisant leurs trajectoires. Le réseau théorique ne comporte plus que 107 000 liens.

Figure 2. La construction d'une grille théorique par le croisement d'un MNT et de la triangulation de Delaunay



Dans cette communication, nous proposons de confronter l'ensemble de ces solutions (tabl. 1) pour évaluer dans quelle mesure la représentation théorique d'une grille de représentation du territoire peut garantir la couverture exhaustive en s'assurant d'une vraisemblance liée aux contextes historiques et géographiques : alors que leur pertinence a déjà été démontré pour les distances euclidiennes, nous la questionnons dans la perspective de temps de parcours, dans la mesure où le couplage entre MNT et grille transcrite l'anisotropie du territoire.

À partir de ces résultats, nous adoptons ce graphe théorique, en appui du premier graphe ferroviaire, pour la construction d'un multigraphe capable de traduire en tout point l'accessibilité vers tout autre point, grâce à l'innovation ferroviaire et à de multiples points dans le temps. Les forts différentiels de vitesse entre la marche à pied et le chemin de fer assurent la continuité des changements de modes. Par ailleurs, l'adoption de ce multigraphe garantit la recherche du point d'entrée le plus efficace sur le réseau – i.e. le long d'un tronçon – plutôt que la recherche systématique de la gare la plus proche.

Tableau 1. Entre précision et généralisation : BD CARTO vs triangulation de Delaunay

			Superficie (km ²)	Coef. de variation	Coef. de corrélation (Spearman)
Distance à la capitale régionale	Nantes	BD routière	32 000	.48	.99
		Triangulation		.49	
	Dijon	BD routière	8 700	.50	.98
		Triangulation		.49	
Distance entre chaque paire de ville	Pays de la Loire	BD routière	32 000	.18	.99
		Triangulation		.18	
	Côte d'Or	BD routière	8 700	.15	.95
		Triangulation		.13	

La création du multigraphe grâce à une grille théorique assure le calcul d'accessibilités en tout point du territoire, de sorte à traduire la déformation des distances par le détachement progressif entre la vision continue et réticulaire du territoire français. Nous misons aussi sur cette grille de représentation du territoire pour construire un modèle de simulation de la croissance du réseau de chemin de fer français.

2. INFLUENCE DES CHOIX D'ÉCHELLE DE LA GRILLE SUR LA MODÉLISATION

Le second temps de notre réflexion consiste à vérifier comment une situation démographique préexistante a impacté la diffusion de l'innovation ferroviaire. Pour cela, nous proposons l'utilisation d'algorithmes de croissance de réseaux de transport. Un objectif est de comparer le réseau à une époque t avec le réseau simulé à partir du réseau à l'époque $t-1$. On ne cherche donc pas une modélisation reproduisant le réseau existant en t mais à construire un réseau efficace en termes d'accessibilité (principal facteur si l'hypothèse théorique est vérifiée) pour le comparer avec le réseau existant en t . Nous discutons ici des limites potentielles des approches classiques utilisées dans la littérature.

On peut diviser les approches proposées dans la littérature en deux catégories : les approches par « plus courts chemins » (Yerra & Levinson, 2006) et les approches biologiques (Tero *et al.*, 2010). Elles fonctionnent de manière itérative. Dans un premier temps, les flux (quantités de personnes ou marchandises se déplaçant entre deux points sur le territoire) sont associés à des tronçons de la grille. Dans un second temps, la vitesse des tronçons est modifiée en fonction du flux total les traversant. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. La différence entre ces deux approches tient à la façon dont les flux sont distribués sur la grille.

Ce sont toutefois les points communs entre ces deux approches qui nous intéressent ici. Elles posent, en effet, deux hypothèses implicites sur la représentation du territoire, des mobilités

et du réseau de transport :

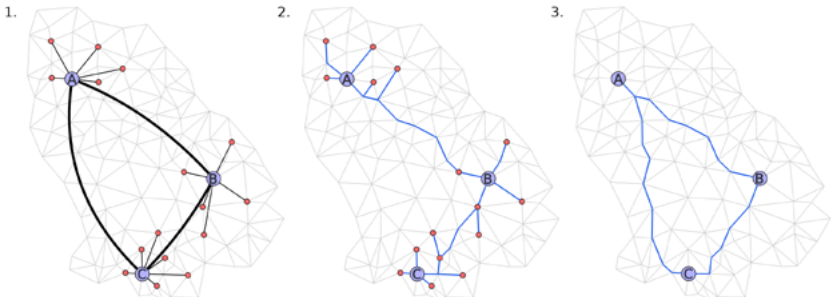
1. La « linéarité » de la grille : le routage des flux sur la grille est sans mémoire. Les méthodes ne tiennent compte que du flux total passant par un tronçon et de la vitesse de ce dernier. Autrement dit, une personne mettant dix heures pour arriver à destination aura autant de poids qu'une personne mettant une minute.
2. L'accès au réseau de transport en n'importe quel point : le réseau de transport produit par les algorithmes correspond à un ensemble de modification de la vitesse de traversée des tronçons sur la grille. Ainsi, on considère chaque point de la grille comme une gare.

Ces hypothèses implicites peuvent avoir un impact important selon les choix d'échelle effectués. En effet, des flux locaux de type centre-périphérie peuvent ne pas être pris en compte selon l'échelle choisie par le chercheur (si on considère, par exemple, l'agglomération et non la « ville » comme unité de base du territoire). La figure 3 illustre cette différence de résultats selon le choix de représentation. Dans le premier cas, les flux entre les centres B et C et leurs périphéries contribuent à rendre le trajet B→C plus attractif au fur et à mesure des itérations. Ainsi, les flux entre (A, C) effectuent au final un détour traversant B. Dans le second cas, on choisit une échelle plus grande en ne considérant que les centres et les flux entre eux. Dans ce cas, le flux (A, C) est directement envoyé sur une route A→C sans détours par B.

Dans cet exemple, il est difficile de déterminer si un choix de représentation est « meilleur » que l'autre. On observe simplement que la prise en compte du local a un effet important sur les trajectoires globales. Il est nécessaire de tenir compte de cet effet en particulier si une hiérarchie de flux existe. Notons ici que, selon les paramètres choisis et l'écartement entre les points, les résultats de l'algorithme peuvent être proches dans les deux cas.

Figure 3. Exemples de résultats d'un algorithme de modélisation par « plus courts chemins » selon le choix d'agrégation

- 1) Une triangulation (arrière-plan) et des flux (les arcs en gras) entre des points de deux types différents : les centres (gris) et les périphéries (rouges)
- 2) et 3) Réseaux de transport (en bleu) obtenus avec ou sans agrégation des centres avec les périphéries



CONCLUSIONS

L'adoption d'une grille de représentation du territoire constitue une véritable opportunité pour les analyses sur le long terme. En effet, les difficultés à constituer un corpus exhaustif et homogène participent au besoin d'une grille d'abstraction du territoire avec des critères pouvant s'adapter aux contextes historique et spatial dans lesquels ils s'inscrivent. Des développements sont actuellement en cours pour mieux appréhender les transformations dans les

rappports entre les territoires liées à la création d'un système hippomobile à l'échelle nationale aux XVII^e et XVIII^e siècles. Dans quelle mesure cette grille est pertinente dans l'analyse d'un réseau dans lequel les différentiels de vitesse ne sont pas aussi prononcés qu'avec le train ? Peut-elle se substituer aux données historiques lacunaires ?

Par ailleurs, on a vu que les approches classiques de réseau de transport incluent des hypothèses qui permettent à l'agrégation de disparités d'influer sur le résultat global. Dans ce cadre, le choix de niveau d'agrégation des flux (doit-on filtrer les flux selon la distance à parcourir ?) est une question qui doit être adressée avant la modélisation. On peut également se demander comment la représentation du réseau issue des algorithmes permet de rendre compte d'un éventuel « effet tunnel » pouvant apparaître avec le développement des lignes hautes vitesses. Cet effet est complètement ignoré par l'hypothèse d'accès direct au réseau. Il pourrait être pertinent d'utiliser des approches alternatives modélisant à la fois les vitesses des tronçons et les points d'entrée sur le réseau. Dans ce contexte, l'apport d'études sur d'autres infrastructures d'accès aux transports (fluviaux, aérien) est pertinent.

RÉFÉRENCES

- Delaunay B., 1934, « Sur la sphère vide », *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 7(793-800) 1–2.
- Levinson D., Yerra B., 2006, « Self-organization of surface transportation networks », *Transportation Science*, 40(2), p. 179-188.
- Mimeur C., Queyroi F., Banos A., Thévenin T., à paraître, « Revisiting the structuring effect of transportation infrastructure: an empirical approach with the French Railway Network from 1860 to 1910 », *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*.
- Pumain D., 1982, « Chemin de fer et croissance urbaine en France au XIX^e siècle », *Annales de géographie*, 91(507) p. 529-550.
- Smith B., Silva T., Khumar A., 2007, « Proceedings format », *Proceedings du 15^e colloque européen de Géographie théorique et quantitative (ECTQG)*, 7-11 septembre 2007, Montreux, Suisse, Presses de l'Université de Lausanne.
- Tero A., Takagi S., Saigusa T., Ito K., Bebber D. P., Fricker M. D., Yumiki K., Kobayashi R., Nakagaki, T., 2010, « Rules for biologically inspired adaptive network design », *Science*, 327(5964), p. 439-442.
- Xuong N. H., 1992, *Mathématiques discrètes et informatique*, Paris, Masson.

LES AUTEUR.E.S

Christophe Mimeur
Université Paris-Est – LVMT
Université de Bourgogne Franche Comté
ThéMA
christophe.mimeur@enpc.fr

François Queyroi
CNRS – Géographie-cités
francois.queyroi@parisgeo.cnrs.fr