

Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques : comment utiliser la carte de Cassini comme source de données ?

Olivier Bonin

▶ **To cite this version:**

Olivier Bonin. Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques : comment utiliser la carte de Cassini comme source de données ?. Flux - Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et territoires, 2016, N° 105 (3), 10.3917/flux.105.0005 . halshs-01676388

HAL Id: halshs-01676388
https://shs.hal.science/halshs-01676388

Submitted on 8 Jan 2018

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.

Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques : comment utiliser la carte de Cassini comme source de données ?

Analysing the growth of transport network on the medium term with cartographic sources: how to turn the Cassini map into a data source?

Olivier Bonin

IFSTTAR – LVMT UMR T 9403

Résumé

L'analyse de l'évolution des réseaux de transport peut se faire par des méthodes issues de la théorie des graphes ou des réseaux, par exemple en modélisant la croissance du réseau ou encore en analysant l'évolution d'indicateurs globaux ou locaux au cours du temps. Cependant, cette approche nécessite de disposer de bases de données géographiques représentant les réseaux à différentes époques. Les cartes sont une source naturelle pour constituer, par vectorisation, de telles bases de données géographiques. Nous montrons dans cet article que, du fait de la nature particulière de la représentation cartographique qui est un modèle du territoire représenté et non une simple image, il est nécessaire de prendre en compte explicitement la relation de modélisation en vigueur à l'époque de la carte pour pouvoir faire la part de l'évolution du territoire et de l'art du cartographe, et reconstruire une sorte d'apparat critique de la carte.

Mots clés : réseaux de transport, cartographie, données historiques, modélisation, analyse spatiale

Abstract

The analysis of the evolution of transport networks can be performed by methods relating to the graph and network theory, for example by modelling the growth of the network or by analysing the evolution of global or local indices. However, this approach requires geographical databases representing the networks at different times. Maps are a natural source to create, by vectorisation, such geographical databases. We show in this article that, because of the particular nature of the cartographic representation that is a model of the territory rather than a mere image, it is necessary to explicitly take into account the modelling relation at the time of the map to be able to distinguish between the evolution of the territory and the art of the cartographer, rebuilding thus a kind of critical apparatus of the map.

Keywords: transport networks, cartography, historical data, modelling, spatial analysis

1. Introduction

Les réseaux de transport sont des objets qui se développent au cours du temps, de manière à assurer une mobilité toujours plus grande et plus fluide des personnes et des marchandises. Ce développement ne se traduit pas nécessairement par une extension spatiale plus importante : la capacité, la vitesse, la fiabilité sont également des facteurs importants de la croissance des réseaux. De même, la multi-modalité est une caractéristique essentielle des déplacements sur ces réseaux : il est difficile d'envisager étudier le développement du réseau routier au XVIII^{e} siècle sans prendre en compte les possibilités de circulation sur les voies navigables par exemple, ou un réseau de transport moderne sans chemin de fer (Dalché, 1986).

Les réseaux ont pris une place importante dans le monde d'aujourd'hui, sous des formes très différentes : réseaux de communication, réseaux de transport, réseaux d'eau, réseaux d'énergie, réseaux sociaux, etc. De manière générale, un réseau est un outil conceptuel permettant de décrire la mise en relation d'un ensemble d'entités par des connexions matérielles (comme un réseau d'eau) ou immatérielles (comme un réseau social). En mathématique, un réseau est associé à un graphe valué, c'est-à-dire un graphe dont les arêtes qui connectent les nœuds associés aux entités portent une valeur numérique caractérisant la relation entre les nœuds. Certaines caractéristiques de la croissance des réseaux peuvent être appréhendées par des indicateurs de la théorie des

graphes, locaux ou globaux (Kansky, 1989), y compris dans le cadre de réseaux de rues ou de réseaux routiers. En effet, la croissance, ou la décroissance, d'un réseau peut passer par une évolution du nombre de nœuds, donc d'entités connectées au réseau, du nombre d'arêtes, donc du nombre de relations entre les nœuds, ou encore de la valuation des arêtes. Par exemple, Muraco, dans son étude sur Indianapolis (Muraco, 1972) compare le réseau principal de la ville en 1954 et en 1975 à l'aide d'indicateurs d'accessibilité et de centralité pour traduire les impacts du développement d'une rocade, et caractériser le déséquilibre est-ouest du développement de cette ville.

L'analyse d'un réseau routier, que ce soit à la fin du XVIII^{e} ou à d'autres époques plus récentes, ne saurait s'appuyer uniquement sur le tracé dudit réseau, et s'effectuer seulement avec des outils de la théorie des graphes. Le réseau routier servant au transport de personnes et de biens, il est indispensable d'introduire dans les analyses la question de la demande de mobilité, le réseau ne décrivant que l'offre de transport disponible, et encore imparfaitement. De même, si on se place dans une optique de mise en évidence de mécanismes de croissance, de facteurs explicatifs, il est indispensable d'introduire des informations sur l'histoire des territoires, la croissance démographique, les échanges commerciaux, etc. Cependant, dans cet article, nous nous plaçons dans l'optique d'étudier la croissance d'un réseau de manière descriptive et non explicative, et soulignons qu'un réseau de transport est associé à un type de graphe très particulier, car il possède une géométrie. Les nœuds ont des positions spatiales correspondant aux positions des entités qu'ils représentent : villes, carrefours, etc. Un réseau de transport possède même une géométrie à travers ses arêtes, lorsque ces arêtes sont des représentations cartographiques du tracé de ses voies.

En exploitant l'ensemble des informations topologiques et métriques, c'est-à-dire en étendant les approches de la théorie des graphes, l'analyse mathématique des réseaux, quoique réductrice, peut apporter une information pertinente. Pour la plupart des modes de transport, on assiste à une croissance sous la forme d'un accroissement du nombre d'arêtes, donc de la longueur totale du réseau, et d'un accroissement du nombre de nœuds, donc de sa connexité (Lin, 2011). Gleyze (2007) propose une méthode pour faire la part des effets spatiaux et des effets réseaux dans de telles analyses. On peut également modéliser la croissance de certains réseaux de transport, notamment ceux où la métrique présente moins d'importance que la topologie, comme les réseaux de métro (Roth *et al*., 2012) ou les plans de ville (Barthelemy *et al*., 2013).

L'approche que nous adoptons est celle du groupe *geohistoricaldata*[i], dont l'un des fondateurs est un physicien co-auteur de deux des études précédemment citées. Nous considérons que la constitution de sources de données numériques à partir des fonds cartographiques existants (dont la carte de Cassini (Pelletier, 2013), la carte d'état-major (Huguenin, 1948 ; Dalché 1994), la nouvelle carte topographique de la France, ainsi que les bases de données numériques qui se sont succédées jusqu'à aujourd'hui) est une étape nécessaire, mais non suffisante, à la production de données permettant des modélisations d'évolution des réseaux à l'échelle de la France, des analyses statistiques, et de l'analyse spatiale. L'équipe *geohistoricaldata* travaille actuellement à la vectorisation des routes, des villes, du réseau hydrographique et des diverses limites portées sur la carte de Cassini, de manière à constituer une base de données contenant dans la mesure du possible les informations de contextualisation qu'apporte une carte. Notons que cette approche modélisatrice est similaire à celle de l'équipe Morphocity[ii] (Douady et al., 2014), qui considère que le réseau des rues constitue un marqueur pertinent des villes, tout en étant consciente du côté réducteur de cette approche, et que l'évolution de ce réseau peut à la fois révéler des régularités, et apporter une contribution à l'étude de phénomènes urbains.

Le relatif petit nombre de cartes de France réalisées est à mettre en regard avec le fait que les réseaux de transport évoluent relativement lentement, et par à-coups. En effet, le développement des réseaux est souvent provoqué ou accéléré par des politiques d'aménagement du territoire, comme la création des Ponts et Chaussées par Colbert ou plus récemment le développement des autoroutes. Pour caractériser cette croissance, la question des sources de données est cruciale : il est nécessaire que les sources cartographiques soient aussi homogènes que possible dans leur spécifications sur l'ensemble du territoire couvert. Le problème majeur ne sera donc pas le peu de points disponibles dans le temps, mais l'hétérogénéité des différentes cartes, au sein d'une même carte, et d'une carte à l'autre.

Nous nous intéressons dans cet article de manière particulière à la carte de Cassini, puisqu'elle est la première carte détaillée relativement homogène réalisée sur le territoire français, et que son processus de vectorisation est quasiment achevé en ce qui concerne le réseau routier. Nous faisons l'hypothèse que les questions et éléments d'analyse que nous avançons dans cet article sont transposables pour la plupart à la carte d'Etat-Major qui lui a succédé, même si la plus grande homogénéisation de la carte au cours du temps rend moins importants certains des points abordés. Notons que le fait que l'exemplaire numérisé par l'EHESS et mis en ligne sur le géoportail, dit « exemplaire de Marie-Antoinette », ait été découpé et entoilé, indique que la carte de Cassini a effectivement été emportée lors de voyages. Le fait que Cassini ait reçu la protection de Trudaine (Pelletier, 2013),

responsable des routes du royaume et par ailleurs ayant ordonné la réalisation d'un atlas routier du royaume (partiel) suggère que la carte de Cassini est pertinente pour l'étude du réseau routier.

Cependant, la numérisation du réseau routier tracé sur la carte de Cassini nous donnera un objet assez différent d'une base de données vectorielle moderne, dans le contenu sinon dans la forme. Ce point, tout en étant évident, est parfois négligé dans les analyses, le caractère numérique des données leur conférant une illusion de véracité. Il est également difficile de prendre en compte les particularités des donnés historiques dans un processus de modélisation. Nous allons donc analyser comment les concepts de réseau, d'infrastructure de transport et d'itinéraire se traduisent à la fois dans le réseau routier de la fin du XVIII^{e} et dans la carte de Cassini, pour proposer une manière d'aborder la source de données qui exploite les hétérogénéités spatiales et temporelles pouvant être mises en évidence, et enfin des pistes pour aborder l'analyse spatiale de données cartographiques historiques. En conclusion, nous suggérons l'utilisation d'autres sources de données pour enrichir les données numériques produites à partir de la carte de Cassini.

1. Réseau, infrastructure, voirie : quels concepts et quelles représentations dans la carte de Cassini ?

Comme nous l'avons montré dans (Bonin, 2014), la carte peut être considérée comme une relation de modélisation, au sens de l'approche relationnelle de la modélisation de Rosen (Rosen, 1985), qui présente, du fait de son support graphique, la particularité de faire appel au calcul spatial pour sa lecture, soit l'utilisation des opérations de comparaison et d'analogie, sans passer par l'utilisation de scalaires ou de vecteurs.

La carte est une représentation abstraite du monde vu d'en haut, en projection orthogonale, au moyen de signes conventionnels que sont les figurés cartographiques. Elle a donc une fonction d'indice, plutôt que d'icône, dans la terminologie de Peirce (Peirce, 1978), car la relation entre la carte et le monde est plus une relation d'analogie qu'une relation de ressemblance. Un trait figurant une route ne ressemble pas à une route sur le terrain, mais évoque, par le jeu de conventions cartographiques, cet objet. Il est donc nécessaire, pour comprendre une carte, de connaître sa légende, mais également ses spécifications, c'est-à-dire la manière dont les objets du monde réel sont transformés en abstractions et représentés (la légende ne traduisant que la représentation graphique de cette abstraction), et enfin, même si c'est implicite dans la plupart des cas, connaître la correspondance entre les termes employés dans les spécifications et les objets du monde réels à l'époque de la carte.

Nous n'allons pas nous étendre sur carte la carte de Cassini, qui a fait l'objet de nombreuses études, dont notamment (de Dainville, 1995 ; Pelletier, 2013) et (Drapeyron, 1896) pour une des premières études d'importance, sinon pour rappeler que cette carte, commencée sous Louis XV, est tout d'abord une grande innovation technique, car elle s'appuie sur un réseau géodésique de la France calculé par triangulation d'une grande qualité, si bien que précision géométrique du calage des objets est remarquable pour l'époque. Le travail des topographes se raccroche à un réseau de points connus avec une excellente précision. Il est ainsi possible de transformer les coordonnées des points de la carte, établie avec une projection d'époque, dans un système de projection moderne, et de rendre ainsi superposable la carte à des images aériennes ou des données géographiques actuelles (Figure 1).

Insérer Carte1.jpg

Figure 1 : superposition de la base de données Route120 de l'IGN (gris) et de la carte de Cassini numérisée (noir). La carte de Cassini présente globalement un moindre niveau de détail sur cet extrait, mais se superpose très correctement à la base de données moderne.

L'assise de la cartographie sur un réseau géodésique répondait aux objectifs ambitieux de César-François Cassini de Thury, troisième de la lignée des Cassini, qui voulait « assurer (…) le positionnement exact des lieux », « déterminer le nombre innombrable de bourgs, villes et villages semés dans toute son étendue » et « représenter ce qui est immuable dans le paysage ». Notons également que le financement de la carte, assuré initialement par le roi, est vite devenu problématique, et qu'une grande souscription nationale a été lancée, introduisant sans doute des intérêts régionaux dans le processus de cartographique du territoire.

La carte de Cassini constitue ainsi une source cartographique de très grande qualité, compatible avec l'objectif de constituer une base de données géographique des réseaux de transport à plusieurs époques, de la fin du XVIII^{e}

jusqu'à nos jours. Cependant, la grande précision du positionnement des objets de doit pas faire oublier qu'elle est le résultat d'une relation de modélisation relationnelle du territoire. Une évolution de réseau entre deux dates dans une carte, comme par exemple l'apparition d'une liaison entre deux localités, peut tout aussi bien refléter une évolution des spécifications de la carte (quelles routes doit-on représenter en fonction de leur nature ?) qu'un changement plus profond du concept même de route, lorsque les cartes sont distantes de plusieurs dizaines, voire centaines d'années.

La difficulté principale à laquelle on est confronté lorsqu'on analyse les données de la carte de Cassini est qu'il est difficile de ne pas être influencé par notre conception moderne du réseau de transport. La carte de Cassini représente *a priori* un réseau routier, donc une infrastructure, mais la notion de réseau renvoie à la fois à des caractéristiques physiques de la voirie et à des concepts d'itinéraires.

Les spécifications de la carte de Cassini imposaient de ne faire figurer que le réseau routier principal, du fait du manque de stabilité et de l'état de qualité variable de ce réseau, et de sa faible importance économique. Précisons que ces « spécifications » ne sont pas à entendre sous la forme d'un document unique qui contiendrait, comme des spécifications modernes, le contenu et la représentation de la carte. Néanmoins, le fait que Cassini justifie l'absence du réseau routier secondaire en invoquant le manque de stabilité de cet élément fait partie des connaissances qui permettent de reconstruire, a posteriori, un certain nombre d'instructions formant l'équivalent des spécifications de la carte. De même, il existe une légende, mais cette dernière n'est pas connue explicitement et a été reconstituée d'après les cartes[iii]. Ce choix se comprend aisément dans un contexte où les déplacements pouvaient s'effectuer en suivant de nombreux itinéraires sillonnant la campagne, c'est-à-dire en dehors des routes pavées dessinées et entretenues par l'administration des Ponts et Chaussées. Dans notre rapport contemporain au réseau de transport, le réseau viaire est une condition nécessaire de réalisation d'un itinéraire. Un déplacement entre une origine et une destination, qu'on appelle un itinéraire, consiste à choisir un chemin optimal sur le réseau viaire reliant les deux points.

La notion d'itinéraire prend un tout autre sens à l'époque de la carte de Cassini. Un itinéraire est une liaison régulière entre deux localités, assurée facilement, par éventuellement un ou plusieurs cheminement sur le réseau, mais également hors du réseau viaire principal, qui peut évoluer au cours du temps, en fonction par exemple des exploitations agricoles, du niveau des cours d'eau, ou le l'insécurité des chemins. La notion de réseau principal prend alors un sens particulier lorsqu'il existe un itinéraire entre deux localités, mais que cet itinéraire peut emprunter différents chemins d'égale importance ou d'égal niveau d'entretien. La carte de Cassini représente alors un des cheminements possibles.

La carte de Cassini représente donc un réseau principal qui regroupe à la fois le réseau viaire de qualité, sous la forme de routes carrossables empierrées et parfois arborées, et des itinéraires importants sur la carte, pour rendre compte de la notion complexe de réseau principal. En outre, la modernisation du réseau routier français, impulsée par Colbert sous Louis XIV, et poursuivie sous Louis XV, était loin d'être achevée lors des levés de la carte de Cassini. Un symbole spécifique décrit d'ailleurs les routes en projet, mais non encore réalisées[iv]. La carte matérialiserait ainsi à la fois un réseau effectivement utilisé, et l'ossature du réseau en cours de constitution au moment de la rédaction de la carte. Nous verrons qu'on peut soupçonner que certaines routes cartographiées comme réalisées n'étaient en réalité qu'à l'état de projet à l'époque de la carte, ou n'avaient pas l'importance que suggère leur symbolisation.

Une autre difficulté dans l'appréhension du réseau vient de l'importance des facteurs limitant l'utilisation de ces réseaux. Le premier facteur est la vitesse : en l'absence de modes de transport mécanisés, il était impossible de parcourir de grandes distances dans la même journée. Les itinéraires se conçoivent donc avec des étapes, ce qui est plus rarement le cas pour les déplacements en France de nos jours. Un réseau ainsi structuré sur des courtes et moyennes distances n'obéit pas aux mêmes impératifs qu'un réseau pensé globalement. Notons d'ailleurs qu'on ne circulait probablement pas beaucoup plus rapidement sur une route pavée arborée que sur un itinéraire secondaire.

Le deuxième facteur est la présence d'infrastructures de transport associées au réseau viaire. Pour permettre de parcourir plus rapidement de grandes distances, il existait un réseau de relais de postes, où les coursiers pouvaient trouver des chevaux frais pour poursuivre leur voyage. Cependant, ce n'était pas un service public comparable aux réseaux de stations services aujourd'hui. A l'origine réservé au seul usage du roi, le service n'a été que progressivement ouvert aux voyageurs. Il est donc important, lorsqu'on analyse un réseau de transport tel que celui de la France de l'époque des Cassini, de se poser la question de savoir quels sont les personnes ou marchandises dont on analyse les conditions potentielles de mobilité par l'étude du réseau.

En outre, la libre circulation des voyageurs et des marchandises n'était pas aussi totale qu'elle peut l'être aujourd'hui. Ainsi, notre vision moderne nous fait appréhender les villes comme des nœuds de communication importants du réseau de transport. Dans un contexte de villes fortifiées, possédant des portes, et pratiquant éventuellement des taxations des marchandises, il faut sans doute penser différemment le rôle des villes dans le réseau de transport.

Enfin, les concepts modernes de multimodalité et d'intermodalité sont à aborder différemment dans le cas du réseau de la carte de Cassini. Par exemple, les franchissements de cours d'eau sont rarement associés à des ponts représentés sur la carte. La continuité des itinéraires pouvait être assurée par des gués ou des bacs, pas nécessairement situés dans le prolongement des routes représentées. Le réseau de la carte de Cassini présente donc un caractère d'apparente déconnexion du fait de l'utilisation nécessairement importante du transport par voie d'eau, ne serait-ce que pour ces franchissements.

2. Hétérogénéité spatiale et temporelle

S'intéresser à des questions d'évolution de réseaux à partir de sources cartographiques soulève la question de la temporalité propre de l'évolution d'un réseau de transport, que nous avons déjà évoquée, ainsi que celle de la temporalité propre de la réalisation de la carte.

La carte de Cassini présente des levés terrain s'échelonnant en 1751 et 1785, pour une publication jusqu'à 1815, dans un contexte de fort développement du réseau routier, comme nous l'avons noté. Elle est découpée en 184 feuilles, ce qui implique le concours d'un grand nombre d'ingénieurs et de cartographes. Le registre tenu par Monsieur de Borda de 1757 à 1780 fait état de près de 70 ingénieurs et de 20 vérificateurs pour la réalisation de la carte. Il est donc inévitable, malgré le caractère scientifique de la carte et la présence de spécifications précises, que la carte dans son ensemble présente une variabilité spatiale et temporelle.

L'hétérogénéité spatiale peut être appréciée qualitativement, tout d'abord en analysant les raccords entre feuilles. La présence d'une route sur une feuille qui n'est pas reprise sur la feuille voisine peut traduire une évolution temporelle de cette route, mais plus probablement une interprétation différente du concept de réseau routier principal tel qu'énoncé par les Cassini. Il est ainsi possible de détecter visuellement, puis de quantifier dans un deuxième temps, des différences de densité manifestes des réseaux entre les feuilles. La feuille des Landes (Figure 2) présente un niveau de densité de réseau routier tout fait anormale par comparaison avec le reste du territoire. La carte de Cassini ne possédant pas de légende formelle, on peut même se demander si les objets qui apparaissent sur la carte avec des figurés identiques à celui des routes sont bien des routes et non pour partie des fossés de drainage.

Insérer Figure3.jpg

Figure 2 : Carte de Cassini vectorisée en superposition avec Route 120 IGN sur la région des Landes. La feuille des Landes se détache visuellement très nettement, car elle présente une densité de réseau nettement plus importante que ses feuilles voisines. Le pendant de cette différence de densité est la présence de nombreuses routes non raccordées. La densité de la carte de Cassini sur cette feuille la rend comparable à Route 500 (en gris, trait fin).

De même, la feuille de Tréguier comporte une densité de réseau extrêmement élevée impossible à expliquer par une particularité régionale ou un levé plus tardif. Il est fort probable que la densité de réseau révèle la volonté des seigneurs du lieu, ou des souscripteurs de la carte, à mettre particulièrement en avant leur territoire.

A l'inverse, certaines cartes semblent extrêmement peu dotées en routes, laissant sans connexion des localités importantes représentées par un simple figuré. La comparaison avec la base de données de Route 120 de l'IGN laisse supposer une trop stricte application du principe de sélection du réseau routier principal, engendrant des déconnexions fortes du réseau et laissant des bourgs importants non desservis (Figure 3). Si les routes reliant ces localités n'avaient pas le statut de route principale pour la carte, il est difficile de les ignorer totalement dans nos analyses, sous peine de détecter une croissance locale forte du réseau dans des territoires qui n'étaient pas à l'évidence déconnectés du reste de la France.

Insérer Figure4.jpg

Figure 3 : l'application stricte du critère de route principale a conduit les cartographes à ne pas en saisir dans le Tardenois et dans la Montagne de Reims (au SO et au S de Reims), produisant une déconnexion importante du réseau, dans une zone par ailleurs riche en localités.

La zone de la Montagne de Reims et du Tardenois de la figure 3 est typique d'une zone où les itinéraires secondaires n'étaient pas associés à des routes empierrées bordées d'arbre, mais plus probablement empruntaient les nombreux chemins qui s'appuyaient sur le relief, et n'étaient donc pas toujours carrossables en période de fortes pluies.

Les quelques illustrations présentées montrent que, dans l'esprit, la plupart des feuilles de la carte de Cassini sont comparables à la base de données Route 120 de l'IGN, qui représente les 120 000 km principaux du réseau routier français (Figure 4). Cependant, le niveau de densité de certaines feuilles la rend plus directement comparable par endroit à Route 500, qui représente les 500 000 km principaux du réseau. Or, l'analyse en aveugle de la comparaison de Route 120 et de Route 500 conduirait à supposer une croissance du réseau routier là où il s'agit simplement de spécifications de contenu différentes des bases de données.

Insérer Figure5.jpg

Figure 4 : superposition de la carte de Cassini et de Route 120. On perçoit l'hétérogénéité de la densité du réseau de Cassini comparé à la relative homogénéité de celui de Route 120. Il est impossible de déterminer dans quelle mesure cette hétérogénéité est attribuable à un moindre développement du réseau principal dans certaines régions, et à une application différente des spécifications de contenu de la carte. Elle reflète cependant fort probablement des développements différenciés du réseau routier dans la France du début du XIX^{ème} siècle.

L'utilisation des villes et bourgs est très utile pour comprendre l'ossature de ce réseau principal : la carte de Cassini comprend de très nombreux toponymes (cf. Figure 5) décrivant les villages, les moulins, les pressoirs, etc. qui ne sont pas explicitement desservis par un réseau représenté mais l'étaient naturellement. Pour chaque feuille, l'analyse des villes et bourgs ayant une représentation cartographique, couplée à celle du réseau, permet de faire la part entre les différents niveaux d'interprétation de ce qu'était le réseau principal de l'époque.

Il est difficile d'imaginer, au-delà de la détection de particularités locales qui font suspecter des anomalies, comment aller vers une homogénéisation des données les rendant plus propres à la comparaison avec des données modernes. Toutefois, les méthodes de l'analyse spatiale peuvent constituer un apport pour analyser ces questions, ou tenter de corriger des anomalies locales lorsqu'elles ont été détectées.

Dans le cas de feuille très denses en réseau routier, comme celle des Landes ou celle de Tréguier, on peut utiliser des algorithmes développés pour la généralisation cartographique pour tenter de sélectionner le réseau principal d'une feuille. On peut notamment mettre en œuvre des algorithmes procédant à une sélection de routes assurant une bonne continuité des axes majeurs (Richardson et Thomson, 1996, Thomson et Richardson, 1999). Dans le cas de la carte de Cassini, ces axes majeurs peuvent être confirmés lorsqu'ils sont en continuité avec les feuilles voisines, ainsi que lorsqu'ils sont qualifiés par des toponymes. Cette méthode permettrait ainsi de traiter les feuilles globalement trop denses (c'est-à-dire celles dont la densité supérieure de réseau ne peut s'expliquer par des particularités locales indiscutables), mais bien entendu ne saurait constituer un traitement systématique sur l'ensemble de la France.

Dans le cas de réseau peu dense, comme celui de la Montagne de Reims et du Tardenois, on peut supposer que, hors obstacle majeur (cours d'eau, montagnes), des localités proches figurant sur la carte étaient probablement reliées par un itinéraire. Il est donc possible, dans ce cas, d'utiliser des méthodes d'analyse de réseau pour détecter les absences manifestes de continuité, et les rétablir avec des arcs virtuels, sur des critères de plus court chemin au réseau principal. Ainsi, sur l'exemple de la Figure 4, il est possible de rétablir la continuité entre Reims et le sud, de manière à rendre cette feuille plus comparable avec ses voisines ; il est certain de toute façon qu'un itinéraire régulier existait entre Reims et Sermiers, bien que, sur la carte, la route ne semble pas monter

plus au nord. Cet exercice est bien sûr hautement périlleux : il ne s'agit pas de laisser à l'algorithme le choix des continuités à rétablir, mais simplement d'aider à saisir des liaisons lorsque l'absence de ces dernières résulte soit d'un arpentage de terrain incomplet, soit d'une application trop stricte de la définition d'une liaison principale.

4. Analyse spatiale sur des données historiques

L'analyse spatiale globale sur des données historiques constituées à partir de sources cartographiques présente des limites si on se contente d'utiliser un seul thème topographique : les processus de levé topographique produisent des données de géométrie souvent insuffisante pour calculer avec précision des longueurs, des angles et des alignements, qui sont nécessaires pour rentrer dans une description fine de la morphologie du réseau.

En revanche, des analyses locales croisant l'ensemble de l'information disponible sur la carte révèlent des évolutions caractéristiques qu'on ne peut expliquer simplement par des évolutions progressives des tracés ou par une densification du réseau à partir d'une armature existante. La figure 5 présente une région autour de la Ferté-Fresnel, dans l'Orne, où l'on constate que le réseau de Cassini, principalement orienté N-S, a cédé la place à un réseau assez différent dans Route 120, orienté NO-SE, reprenant très peu le réseau historique.

Insérer Figure6.jpg

Figure 5 : extrait de la carte de Cassini (exemplaire de Marie-Antoinette aquarellé, mis en ligne sur le géoportail), avec en superposition Route 120 et le réseau routier vectorisé. Le réseau route 120 contemporain s'appuie très peu sur le réseau historique dans cette région de l'Orne.

Il apparaît clairement que l'orographie joue un rôle important dans le tracé du réseau routier. Sur l'exemple de la figure 5, les structures du relief principales sont figurées par des lignes bistres, et révèlent que le réseau est en grande partie aligné sur ces structures, tandis que le réseau moderne traverse le relief, sans doute grâce à un usage plus important de remblais et de déblais. L'étude de l'évolution du réseau routier nécessite donc, pour limiter les problèmes liés à la résolution spatiale des données et aux biais de sélection locaux des routes à représenter, d'introduire des éléments structurants. Il est ainsi utile de prendre en compte les villes et localités à relier entre elles, et les obstacles au tracé des routes, avec en premier lieu l'hydrographie et le relief. La vectorisation de ces éléments à partir de la carte de Cassini est d'ailleurs en cours.

Il nous semble donc qu'une façon d'aider à faire la part entre geste du cartographe et réelles évolutions sur le terrain, ainsi qu'à prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des évolutions constatées entres différentes dates, consiste à introduire des éléments structurants du transport même, avec en premier lieu une caractérisation fine des lieux reliés par le réseau, et la prise en compte des contraintes au déploiement spatial du réseau, dont le relief et les cours d'eau.

Enfin, l'utilisation conjointe d'information sémantique déduites des toponymes et reconstruites à partir de la forme des objets peut aider à nourrir l'analyse. La figure 6 montre une route parfaitement rectiligne, nommée « chemin de Reims à Charleville », ce qui laisse supposer une liaison importante et structurante, qui aurait soit disparu au cours du temps, soit été classée par erreur dans la catégorie des liaisons principales ; elle correspondrait alors au tracé en trait fin qui serpente autour de ce chemin. La détection de ce type d'événement structurant peut facilement être automatisée à l'aide de méthode d'analyse spatiale. Les routes parfaitement rectilignes sur des très longues distances sont des candidats à la vérification ; lorsque de telles routes traversent des lignes orographiques, on peut soupçonner soit un problème de qualité du levé, soit qu'il s'agit d'une route toute récente, faisant partie du nouveau réseau réalisé par les Ponts et Chaussées, soit encore d'une route en projet. Une dernière hypothèse peut être avancée : celle de l'existence d'une ancienne voie romaine, structurante mais de faible importance. Cette hypothèse est tout à fait crédible dans le cas de cet exemple, comme semblent le suggérer des relevés de terrain[v]. Dans tous les cas, la géométrie de la route nous apprend quelque chose de sa nature. Nous avons confronté ce tracé qui pose question dans d'autres exemplaires disponibles[vi] : si le chemin de Reims à Charleville apparaît toujours, dans certains exemplaires il se distingue cette fois-ce nettement des deux autres chemins qui l'encadrent : il est en trait fin, et non arboré, indiquant par là qu'il s'agit d'une liaison matérialisée de manière peu importante sur le terrain. La version aquarellée utilisée pour la saisie de laisse pas apparaître aussi nettement la différence de catégorie (sans que l'on puisse savoir si c'est un effet de l'aquarellage ou une mise à jour ultérieure), et l'itinéraire plein nord depuis Reims, non arboré dans la version aquarellée devient arboré dans une version mise à jour.

Insérer Figure7.jpg

Figure 6 : extrait de la carte de Cassini dans la région de Reims, avec en superposition le réseau vectorisé, Route 120 et Route 500. Le chemin de Reims à Charleville, rectiligne et quittant Reims ver le NNE, n'est présent ni dans Route 120 ni directement dans Route 500. Il a disparu malgré son caractère rectiligne et son toponyme évoquant un rôle structurant ; il s'agit soit d'un projet, soit d'une représentation simplifiée de la route passant par Frêne (aujourd'hui Fresnes-lès-Reims) puis Boult (aujourd'hui Boult-sur-Suippe), probablement une ancienne voie romaine. Le fait que Reims, Rethel et Charleville-Mézières soient alignés de manière presque parfaite rend d'autant plus suspect ce chemin de Reims à Charleville, étant donné que le chemin de Rethel existe déjà et est représenté. Par ailleurs, si ce chemin se raccorde sur la feuille située au nord de la feuille de Reims, il se raccorde à un chemin nettement moins rectiligne qui s'arrête rapidement à Taizy.

Conclusion

L'étude de la croissance ou de la décroissance des réseaux de transport peut se faire pour partie à partir de bases de données géographiques, en mobilisant des méthodes d'analyse spatiale et de théorie des graphes. C'est en tout cas l'approche choisie par plusieurs groupes pluridisciplinaires associant physiciens, urbanistes, géographes et historiens. Dans le cas de données sur le passé, les cartes constituent des sources naturelles pour créer, par vectorisation, des bases de données historiques, qui serviront ensuite à estimer des modèles de morphogenèse. Dans cette optique, le réseau est analysé pour sa forme, et non sa fonction d'assurer la mobilité de biens et de personnes.

Cependant, la nature même des sources cartographiques employées lors de la constitution de bases de données historiques, ainsi que les évolutions des concepts et pratiques liées au transport, induisent des contraintes et particularités dans l'analyse spatiale qu'il est indispensable de prendre en compte. Nous avons montré comment l'analyse de la production cartographique donne des éléments pour aider à faire la part entre évolution réelle sur le terrain et évolution des pratiques des cartographes, et souligné l'évolution du concept de réseau de transport au cours des siècles, pour aider à comprendre la part de significativité dans les écarts mesurés entre deux bases de données distantes dans le temps. Nous défendons l'idée qu'il est indispensable d'introduire des éléments structurants extérieurs au problème et relativement invariants dans le temps, comme l'hydrographie et le relief, pour commencer à poser les bases d'une modélisation. Par ailleurs, les ressources de l'analyse spatiale dans d'autres domaines, comme celui de la généralisation cartographique, peuvent aider à rendre localement les données plus comparables lorsque des hétérogénéités ont été détectées.

La détection et l'analyse contextuelle des itinéraires importants, associés à des tracés rectilignes et généralement nommés, permettent aussi de faire la part entre ossature principale du réseau, projets en cours de réalisation et itinéraires d'importance historique. La carte de Cassini ayant été mise à jour, nous avons été en mesure dans certains cas de comparer entre les différentes versions le statut de certaines routes, levant ainsi des ambiguïtés de légende. L'analyse des raccords entre cartes, et des différences locales de densité de réseau, ainsi que des dates de réalisation de la carte, permet également d'éclairer un certain nombre de différences explicables par des facteurs politiques ou topographiques. Enfin, l'utilisation de données de contextualisation du réseau, et notamment de l'orographie, permet de poser des hypothèses sur la forme locale du réseau.

L'Ecole des ponts a numérisé et mis en ligne un fonds historique très important, comportant de nombreuses sources sur les projets de transport[vii], cartographiques et non cartographiques. Ces documents fournissent une source précieuse pour analyser au cas par cas des exemples litigieux, comportant dans de nombreux exemples des variantes de projets qui peuvent être confrontés à la carte de Cassini. C'est une perspective très importante de ce travail qui sera mise en œuvre, de même que le dépouillement des très nombreuses minutes et documents conservés à la cartothèque de l'IGN et auxquels nous avons eu accès.

Ajoutons enfin que d'autres sources de données, non cartographiques, peuvent être utilisées avec profit dans les analyses. Une de ces sources est les récits de voyage, ou la description de grands itinéraires, comme les chemins de Saint-Jacques de Compostelle. Le voyage d'Arthur Young (Young, 1792) fournit ainsi une bonne description de nombreux itinéraires et paysages à la fin du XVIII^{e} siècle en France et en Italie. En repositionnant les voyages d'Arthur Young sur la carte de Cassini et en confrontant représentation cartographique et description des paysages, on est capable progressivement d'acquérir une connaissance sur l'apport de la source cartographique à la fois sur les itinéraires, et sur les paysages traversés. Ces sources sont en cours d'exploitation pour caractériser

plus finement le réseau représenté par la carte de Cassini, et ainsi poser les éléments qui permettront, par une même analyse critique appliquée à la carte d'état-major, de comparer les réseaux de la carte de Cassini et de la carte qui lui a succédé.

L'auteur tient à remercier l'un des évaluateurs qui a permis de préciser et corriger certaines hypothèses avancées dans cet article.

Références

Barthelemy, M., Bordin, P., Berestycki, H., Gribaudi, M., 2013, Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city, *Sci. Rep.* 3.

Bonin, O., 2014, La carte, modèle analogique et calcul spatial, *Communication & Langage*, n°180, 47-61.

de Dainville F., 1995, La carte de France et son intérêt géographique, *Bulletin de l'Association des géographes français*, n° 251-252, mai-juin 1955, p. 138-147.

Dalché, P.G., 1994, La représentation de l'espace. De Jean de Mandeville à la carte de l'état-major. *Rev synth* 115, 199–206.

Drapeyron L., 1896, La Vie et les travaux géographiques de Cassini de Thury, *Revue de géographie*, octobre 1896 (En ligne sur gallica.bnf.fr)

Gelyze, J.-F., 2007, Effets spatiaux et effets réseau dans l'évaluation d'indicateurs sur les nœuds d'un réseau d'infrastructure, *Cybergeo : European Journal of Geography* (En ligne), Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 370, mis en ligne le 15 avril 2007.

Huguenin M., 1948, *Historique de la cartographie de la nouvelle carte de France*, Paris, Imprimerie de l'institut géographique national.

Kansky K., 1989, Measures of Network Structure, *Flux*, Numéro spécial 1989, 93-121.

Lepetit, B., 1986, L'impensable réseau. Les routes françaises avant les chemins de fer, *Flux* 2, 11–29.

Lin, K.-C., 2011, Le développement du réseau routier en Chine : inconséquences et inégalités. *Revue int. de politique comparée* Vol. 18, 151–179.

Malaisse, F., Chiffaut, A., Petit, F., Engels, P., Leteinturier, B., 2000, Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le XVIII^{e} siècle / Changing dynamics of the Loire river in Burgundy (France) during the last 200 years, *morfo* 6, 239–251.

Muraco W.A., 1972, Intraurban Accessibility, *Economic Geography*, Vol.48, 388-405.

Peirce C. S., 1978, *Écrits sur le signe*, rassemblés traduits et commentés par G. Deledalle, Paris, Le Seuil.

Pelletier, M., 2013, *Les cartes des Cassini, la science au service de l'état et des provinces*, CTHS, Paris.

Richardson D.E., Thomson R.C., 1996, « Integrating Thematic, Geometric and Topologic Information in the Generalization of Road Networks », *Cartographica*, vol. 33, p. 75–83.

Roth, C., Kang, S.M., Batty, M., Barthelemy, M., 2012, A long-time limit for world subway networks, *J. R. Soc. Interface*.

Thomson R.C., Richardson D.E., 1999, « The "Good Continuation" Principle of Perceptual Organization applied to the Generalization of Road Networks », *dans Proceedings of 19th International Cartographic Conference (ICC'99)*, Ottawa (Canada), p. 1215-1223.

Young, A., 1791, *Travels, During the Years 1787, 1788, and 1789*. London: George Bell and Sons, 1909.

Olivier Bonin est géographe et docteur en mathématiques. Ses travaux portent sur la modélisation urbaine et sur la cartographie. Ancien élève de l'école de l'IGN et de l'école des Ponts, il est actuellement chercheur au Laboratoire Ville Mobilité Transport (UMR T 9403).

---

[i] Le groupe *geohistoricaldata* a été fondé et est animé par Maurizio Gribaudi, historien au CRH de l'EHESS, Julien Perret, géomaticien au laboratoire COGIT de l'IGN, et Marc Barthélémy, physicien au CEA.

[ii] L'équipe Morphocity est une équipe pluridisciplinaire réunissant urbanistes, archéogéographes, géomaticiens et physiciens cherchant à modéliser la complexité urbaine, auteur de travaux sur l'analyse de la morphologie des réseaux urbains et de leur croissance.

iii http://cassini.ehess.fr/cassini/fr/html/routes.htm

iv Cette catégorie de routes en projet peut sembler en contradiction avec le projet de Cassini de ne décrire que le réseau pérenne. Cependant, l'EHESS fait l'hypothèse que les tracés en pointillé double désignent des routes en projet (cf. supra).

[v] http://romarden.e-monsite.com/pages/voie-reims-chateau-porcien-a-d.html

[vi] La carte de Cassini a été mise à jour principalement entre 1803 et 1812 directement sur les cartes de cuivre. Il existe une deuxième édition de 1815, mais qui ne comporte pas l'intégralité des planches. Par ailleurs, divers exemplaires parvenus jusqu'à aujourd'hui sont désignés par le nom des collections : BNF (plusieurs versions), Hauslab-Liechtenstein, David Rumsey, etc.

[vii] http://patrimoine.enpc.fr/