



Les réseaux de transport à grande vitesse en France : construction et apports d'un système d'information géo-historique

Françoise Bahoken, Christophe Mimeur, Martin Koning, Thomas Thévenin

► To cite this version:

Françoise Bahoken, Christophe Mimeur, Martin Koning, Thomas Thévenin. Les réseaux de transport à grande vitesse en France : construction et apports d'un système d'information géo-historique. SAGEO 2016 - Spatial Analysis and Geomatics, Dec 2016, Nice, France. 19p. hal-01429023v3

HAL Id: hal-01429023

<https://hal.science/hal-01429023v3>

Submitted on 9 May 2017

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.

Les réseaux de transport à grande vitesse en France : construction et apports d'un système d'information géo-historique

Françoise Bahoken^{1,2}, Christophe Mimeur³, Martin Koning¹, Thomas Thevenin³.

¹ Institut français des sciences et technologies des transports, des réseaux et de l'aménagement (IFSTTAR-AME / SPLOTT)

² Géographie-Cités / Équipe PARIS (UMR 8504)

³ THEMA-Dijon (UMR 6049 CNRS, Université de Bourgogne)

RÉSUMÉ. *L'originalité de ce Système d'Information Géographique Historique (SIGH) et temporel tient tant dans le type de données mobilisées (il porte sur les réseaux de transport viaires et ferroviaires à grande vitesse) que dans leur profondeur temporelle (de 1975 et 2010). Les possibilités de calcul de matrices de distances kilométriques et/ou temporelles sur réseaux, à l'échelle de la France et à différentes dates, ouvrent d'importantes perspectives d'analyses spatiales. Ils permettent notamment d'apprécier l'effet des investissements réalisés dans l'offre de transport à grande vitesse sur les durées de déplacements interurbains, avec de multiples possibilités d'analyses dans le champ des sciences régionales et des systèmes complexes.*

ABSTRACT. *The originality of this Historical Geographic Information System (SIGH) is that it is focuses on various transport networks (road and railway) at several temporal scale (from 1975 to 2010). The corresponding spatial network offers the possibility to generate spatial and temporal matrices across France, at different dates. These possibilities open important spatial analysis perspectives. They allow for example to assess the effect of investments in high-speed transport supply on the durations of intercity trips, also multiple opportunity in the field of Regional Science and Complex Systems analysis.*

MOTS-CLÉS : réseau routier, réseau ferroviaire, réseau géo-historique, matrice de distance, matrice de distance-temps.

KEYWORDS: road network, railway, geo-historical network, distance matrice, temporal matrice

Les travaux présentés ont été financés par le projet de recherche BASECOGV (IFSTTAR-AME/SPLOTT, Universités Paris-Est Marne la Vallée et de Reims) du PREDIT « Crise, évolution des modes de vie, mobilité et politique de transport » (Convention de recherche n°13-MT-G06-4-CVS-004) ; ils ont été réalisés en collaboration avec l'UMR n°6049 Théma-Dijon.

1. Introduction

Les évolutions des modes de transports utilisés par les Hommes, de leurs choix d'itinéraire et des pratiques aux lieux de destination constituent des sujets d'étude d'autant plus importants que les possibilités d'analyses spatiales ont été récemment décuplées, grâce à la généralisation des Systèmes d'information géographique (SIG) notamment. Si la portée opérationnelle de ces outils n'est plus à démontrer, leurs potentialités spécifiques pour analyser des données de mobilités et leurs interactions avec les dynamiques socio-économiques locales demeurent encore largement sous-exploitées. Qu'ils portent sur la demande ou sur l'offre de transport (les infrastructures et les services), peu de travaux semblent ainsi mobiliser des SIG de réseaux, qui plus est dans une perspective historique, *a contrario* des travaux anglo-saxons (Gregory et Hell, 2007). Pourtant, l'utilisation des SIG-Historiques (SIGH) n'est pas dénuée d'intérêts, que ce soit pour les historiens, les géographes ou les économistes.

Cette communication présente l'élaboration d'un SIGH décrivant les réseaux de transport routiers et ferroviaires interurbains en France entre 1975 et 2010. Ce corpus fut élaboré dans le cadre du contrat de recherche BASECOGV financé par le PREDIT (Koning et al., 2015) visant à appréhender certains effets économiques territoriaux liés aux investissements successifs dans les infrastructures ferroviaires à grande vitesse. Si divers auteurs (Dancoisne, P., 1984 ; Dupuy, G et Stransky, V., 1996) ont comparé les performances des réseaux routiers et ferroviaires à une date donnée et/ou suivi l'évolution temporelle d'un réseau particulier, rares sont les études (à notre connaissance) qui contrastent les deux dimensions : bimodale et historique.

Nous décrivons tout d'abord la constitution de l'état du réseau, en 2010, qui servira de base à la reconstitution d'états antérieurs (Section 2). La nécessité de disposer de matrices de distances kilométriques et/ou temporelles sur réseaux nous a conduit à transformer les réseaux en graphes spatiaux, puis à les enrichir (Section 3). Une première analyse portant sur l'évolution des performances comparées de déplacements (route *versus* fer) entre une sélection de 231 unités urbaines (UU) est finalement présentée (Section 4).

2. La reconstruction de réseaux routiers et ferroviaires à grande vitesse

Les distances parcourues et les temps de parcours entre des couples de lieux d'origine et de destination (OD) occupent un rôle central dans les analyses des mobilités spatialisées, notamment au travers de la fonction d'impédance spatiale. En effet, alors que pendant des siècles les déplacements étaient caractérisés par une « *lenteur homogène* » (Ollivro, 2000), les réseaux de transport nés des innovations techniques ont instauré l'essor de la « *rapidité différenciée* » (*ibid.*), avec un bouleversement des rapports de l'Homme avec son espace. Les espaces de proximité se sont élargis et l'horizon des déplacements s'est étendu. C'est pourquoi il est

important que la mesure soit effectuée sur les différents réseaux physiques de transport reliant des OD et non seulement à vol d'oiseau. Si la mesure de distance euclidienne est souvent privilégiée dans l'analyse des mobilités, elle n'en demeure pas moins théorique et insuffisamment précise. Disposer de mesures de distances-temps sur réseau suppose de connaître, outre la position (x,y) des OD, celle de leurs liaisons orientées (Lij), autrement dit de disposer d'un graphe spatial (G) symbolisant ces réseaux.

2.1. La constitution de l'état du réseau en 2010

Les données élémentaires mobilisées dans le SIGH portent à la fois sur des nœuds, qui correspondent aux UU, que sur les liens qui les unissent, c'est-à-dire sur infrastructures de transport à grande vitesse. La première étape de l'analyse a donné lieu à la construction de l'état du réseau pour l'année 2010 : le fichier de nœuds correspond aux centres géométriques des UU analysées dans le projet BASECOGV; le fichier de liens étant formé des tronçons viaires et ferroviaires à grande vitesse. La seconde étape fut la reconstitution des réseaux pour 1975, 1982, 1990 et 1999.

2.1.1. Les nœuds du réseau : les unités urbaines

Le choix des UU comme unité spatiale élémentaire se justifie par le fait que nous souhaitons disposer d'une définition plus large et plus dense de l'agglomération urbaine, notamment au regard de celle d'aires urbaines (AU) dont les densités et les superficies sont moindres. En 1999, 18% du territoire est intégré dans une UU contre 41% pour une AU. D'autre part, les UU sont une maille territoriale pertinente pour analyser les interdépendances socio-économiques liées à l'offre de transports interurbains. L'échantillon retenu comporte 231 UU comptant au moins 20000 habitants en 1999. Pour des raisons évidentes de continuité spatiale des réseaux, les UU insulaires (en Corse ou dans les DOM-TOM) ont été écartées.

Le zonage territorial en UU de l'INSEE fut reconstitué à partir d'une agrégation attributaire du fond communal de GEOFLA© de l'IGN, grâce à la table de passage fournie par l'INSEE. Malgré les redécoupages des périmètres des communes et des UU ayant pu intervenir au cours du temps, seule la géographie de 1999 de l'INSEE a été considérée. La distribution spatiale des 231 UU considérées, dans l'ensemble des UU françaises, est présentée sur la Figure 1.

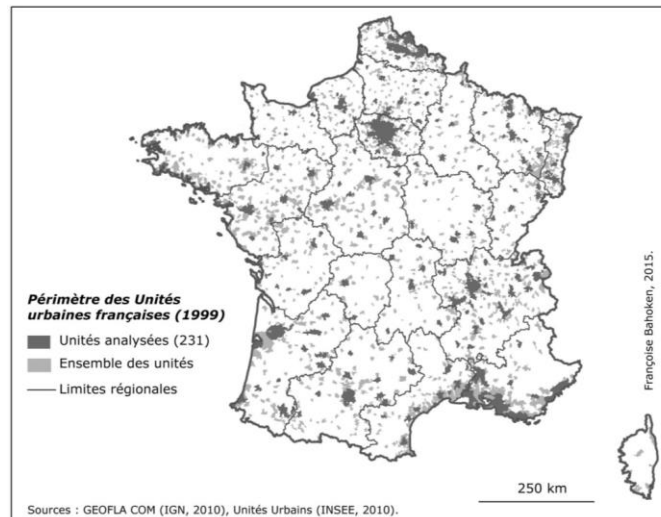


Figure 1. Localisation des unités urbaines analysées

2.1.1. Les liens ou tronçons du réseau en 2010

La construction des linéaires des réseaux routiers et ferroviaires a été réalisée à partir de sources IGN et SNCF Réseau (ex RFF).

Pour les tronçons routiers, nous avons opté pour une définition extensive de la grande vitesse à partir d'une requête par sélection de tronçons de la base GEOROUTE500 de l'IGN. Furent considérées les voies principales à caractère autoroutier ; les bretelles d'accès ; les routes nationales et les liaisons principales, incluant des routes départementales. Une partie du réseau routier principal intra-urbain a en outre été intégrée afin que les centres géométriques des UU puissent être connectés au réseau (phase d'approche). En dehors des zones urbaines, le réseau local d'appoint (initialement constitué pour compléter les linéaires discontinus en raison de la construction des autoroutes) n'a pas été retenu.

Pour le réseau ferroviaire, les lignes à grande vitesse (LGV) correspondent aux tronçons spécialement conçus pour accueillir des trains à grande vitesse (TGV). Il s'agit de lignes électrifiées où la vitesse de circulation commerciale est supérieure ou égale à 250km/h, ainsi que de certaines autres voies classiques ferroviaires électrifiées pouvant accueillir un TGV.

2.2. La reconstitution des réseaux historiques

C'est à partir des fichiers vectoriels de voies routières et ferroviaires de 2010 que les réseaux historiques (1975, 1982, 1990, 1999) ont été reconstitués. Pour le réseau

BASECOGV, une base de données géo historique sur les réseaux à grande vitesse 5

ferroviaire, la base de données FRANcE, développée par Théma, décrivant l'ensemble des tronçons du XIX^{ième} jusqu'en 2000 a été mobilisée. Ce n'est que dans un troisième temps que la connexion des UU aux différents tronçons des réseaux fut réalisée.

2.2.1. La reconstitution des réseaux routiers historiques

La reconstitution des réseaux routiers a été précédée d'une importante opération de géo-référencement portant sur un corpus de cartes anciennes scannées, décrivant le réseau routier entre 1975 et 2010. Quatre séries de cartes de l'IGN ont ainsi été mobilisées, à savoir :

- la série 901, pour la France entière, au 1/10 00 000 ;
- la série Rouge des cartes régionales au 1/250 000, pour les années 1975, 1982 et 1990 ;
- la série Top250 des cartes régionales au 1/250 000, pour l'année 1990 ;
- la série R** des cartes régionales au 1/250 000, pour les années 2006 et 2010.
- La couverture régionale étant incomplète pour les années antérieures à 2006, des fonds complémentaires ont été ponctuellement mobilisés.

Après leur intégration sous QGis, les scans de ces cartes ont fait l'objet d'un géo-référencement en Lambert93, la couche de référence étant le réseau vectoriel de 2010. Pour chacune des années, une procédure d'actualisation de la géométrie du réseau routier de 2010 a ainsi été mise en œuvre, de manière systématique, pour garantir la comparabilité complète des différentes couches, ainsi que la saisie par comparaison visuelle, à partir d'un carroyage régulier, avec des erreurs très ponctuellement supérieures à 2 pixels.

C'est ainsi que la couche de voies routières de 1999 correspond à celles de 2010 diminuées des tronçons qui n'étaient pas visibles sur les cartes régionales de 1990 et ainsi de suite pour l'ensemble des années. Le Tableau 1 présente l'évolution des linéaires de voies routières répertoriées dans le SIGH.

Classe administrative	1975	1982	1990	1999	2010
Autoroutes	4 039	6 153	7 771	9 720	11 377
Route nationales	9 159	9 287	9 403	9 593	10 771
Autres routes	47 568	47 704	48 521	49 297	51 604
Ensemble	60 766	63 145	65 695	68 610	73 752

Source : BASECOGV, 2015.

Tableau 1. Evolution des linéaires routiers (en km) par classe administrative

2.2.2. La reconstitution des réseaux ferroviaires à différentes dates

La reconstitution des réseaux ferroviaires s'appuie sur la base de données FRANcE de Théma. Ce corpus répertorie à l'échelle nationale l'ensemble des tronçons du réseau ferroviaire pour la période 1830-2000. Challenges traditionnels

BASECOGV, une base de données géo historique sur les réseaux à grande vitesse 6

des SIG-H, la diversité et l'hétérogénéité des sources historiques (Gregory et Hell, 2007) ont impacté les choix d'implémentation à l'intérieur de la base de données. Pour autant, la richesse des informations collectées nous donne accès à un large éventail d'attributs.

FRANcE a été mobilisée conjointement à la carte de RFF (SNCF Réseaux), aux cartes régionales de l'IGN et au fichier BD ROUTE500(c) de l'IGN pour l'année 2010. L'état du linéaire a d'abord été identifié visuellement, à partir de la carte de RFF. La création des réseaux antérieurs a ensuite été obtenue – comme pour le réseau routier – par une comparaison visuelle. Les tronçons à usage du fret n'ont pas été retenus. Nous avons aussi supposé que les tronçons de 2000 demeuraient ouverts en 2010, date pour laquelle nous avons intégré, à partir du fichier GEOROUTE500©, la LGV Est inaugurée en 2007. Le tableau 2 présente l'évolution des linéaires de voies ferrées.

Classe administrative	1975	1982	1990	1999	2010
LGV	-	300	705	1274	1826
TGV	-	1601	4739	5044	7906
Corail	5782	5782	5782	5782	4819
TER	17726	15971	12575	12106	10200
RER	10	24	47	62	62
Local	225	182	223	216	216
Autres	2994	1895	2113	2027	1805
Ensemble (km)	26737	25755	26183	26511	26834

Source : BASECOGV (2015).

Tableau 2. *Evolution des linéaires ferroviaires (en km) par classe administrative*

2.1.3. La connexion des unités urbaines aux réseaux

Les UU concernées ont été connectées à un tronçon de voie routière et/ou ferroviaire, aux différentes dates, à partir de leur barycentre.

Cette connexion a été considérée comme effective – y compris sur les lignes classiques – dès lors qu'elle dispose d'un accès à une autoroute ou à une voie routière express ; à une gare de TGV ou de voie ferroviaire. En raison de « l'effet tunnel » caractéristique des LGV, toutes les gares se trouvant sur le tracé d'une infrastructure n'y sont pas nécessairement connectées, certaines d'entre elles n'étant d'ailleurs que des gares de transit ou de fret. La connexion de l'UU au réseau à grande vitesse a, en outre, été difficile à estimer, dans la mesure où certaines autoroutes sont éloignées des agglomérations. Dans ce cas, la connexion au réseau autoroutier a été considérée comme effective dès que l'UU est située à moins de 10 km à vol d'oiseau d'un échangeur permettant l'accès à une autoroute. Les accès autoroutiers situés à plus de 20 km du réseau principal d'une UU ont donc arbitrairement entraîné l'exclusion de l'UU car considérées comme trop éloignées du réseau principal.

Pour déterminer les UU connectées au réseau de TGV, nous nous sommes appuyés sur les gares répertoriées dans GEOROUTE500©, situées dans le périmètre des UU, avec la liste des gares desservies par un TGV en 2015 fournie par la SNCF. Pour chacune des années, ont été supprimées les gares hors réseau ou qui ne sont pas encore mises en service public. La connexion des UU au réseau de LGV fut plus délicate, dans la mesure où certaines gares sont construites à une distance importante de l'agglomération à laquelle elles sont théoriquement rattachées (par exemple, celles de Haute-Picardie et de Lorraine TGV)¹. Pour tenir compte de ces particularités, une UU a été considérée comme desservie par une LGV si 1) une gare nouvelle (dédiée uniquement aux dessertes LGV) se trouve dans l'UU et/ou 2) il existe des liaisons régulières et dédiées, *via* d'autres modes de transport, entre l'UU et une gare nouvelle (comme le cas de la gare de Lorraine TGV desservie par un bus vers/depuis Nancy et Metz).

	1975	1982	1990	1999	2010
<i>Linéaire de réseau routier (km)</i>	60766	63 145	65 695	68 610	73 752
dont autoroutes	4039	6 153	7 771	9 720	11 377
UU desservies par autoroutes (%)	28.6	51.5	59.7	82.3	92.6
<i>Linéaire de réseau ferroviaire (km)</i>	26737	25 755	26 183	26 511	26 834
dont LGV	0	300	705	1 274	1 826
dont TGV, sur lignes classiques	0	1 601	4 739	5 044	7 906
UU desservies par LGV (%)	0.0	3.3	3.5	5.6	8.7
UU desservies par TGV (%)	0.0	10.4	27.3	31.6	45.9

Source : BASECOGV (2015).

Tableau 3. *Evolution des kilométrages des réseaux viaire et ferroviaire et de la connectivité des UU à ces réseaux (1975-2010)*

Une vérification générale de la connectivité de l'ensemble des UU à un point du réseau viaire ou ferroviaire, au moins, fut ensuite réalisée. Des corrections manuelles ont été effectuées sur le réseau routier, afin d'assurer la connexité du réseau sans laquelle le calcul des itinéraires complets eut été impossible. Le Tableau 3 compare les linéaires kilométriques disponibles pour chaque réseau et chaque date ainsi que la connectivité des UU à ces réseaux.

Au final, l'architecture de la base de données est présentée sur la Figure 2.

¹ Les choix de localisation des gares de TGV tiennent, en effet, pour beaucoup d'impératifs économiques (Facchinetti-Mannone et al., 2010). Ils sont liés au coût et à la disponibilité du foncier généralement plus accessible dans les espaces ruraux qu'en périphérie urbaine ; aussi environnementales, liées à un impératif de diminution de la pollution sonore des riverains.

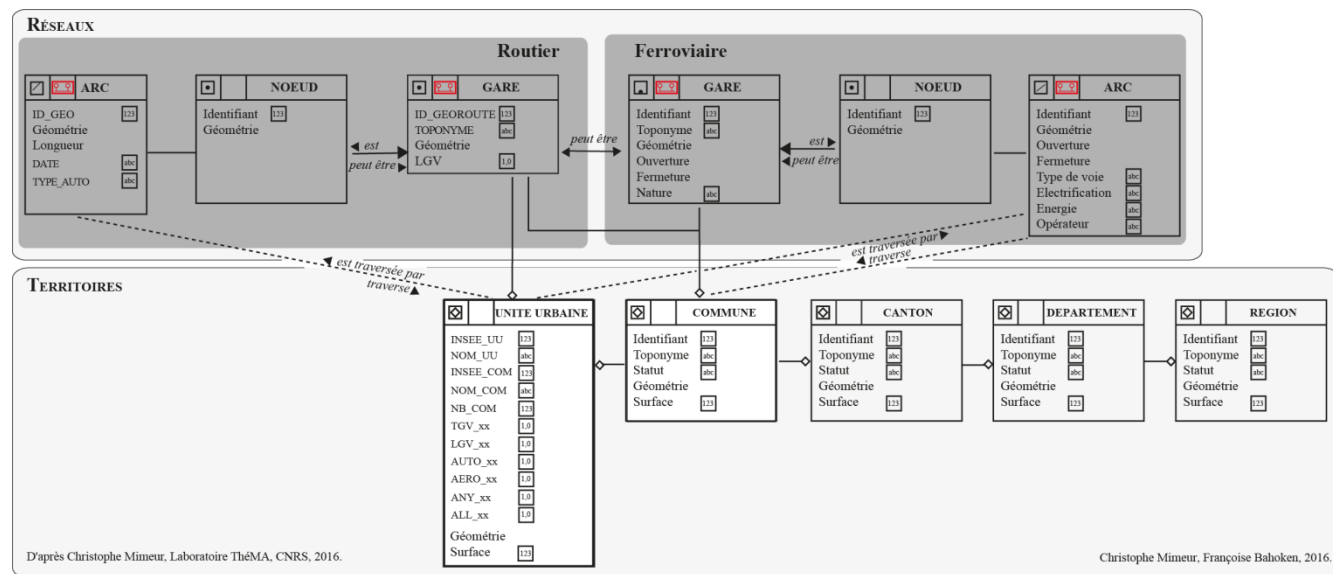


Figure 2. Architecture générale du SIG-H

Le SIG-H recense 27 000 km de voies ferroviaires en 2010, dont 1800 km de LGV et 7 900 km de voies classiques sur lesquelles peuvent circuler des TGV ; et 74 000 km de voies routières, dont 11400 km d'autoroutes. Si le réseau viaire a augmenté de 17% entre 1982 et 2010, celui de voies ferrées apparaît relativement stable, à +4%, en raison notamment de la fermeture des lignes trop vétustes et/ou peu utilisées. La Figure 3 décrit l'évolution de ces réseaux, entre 1975 et 2010.

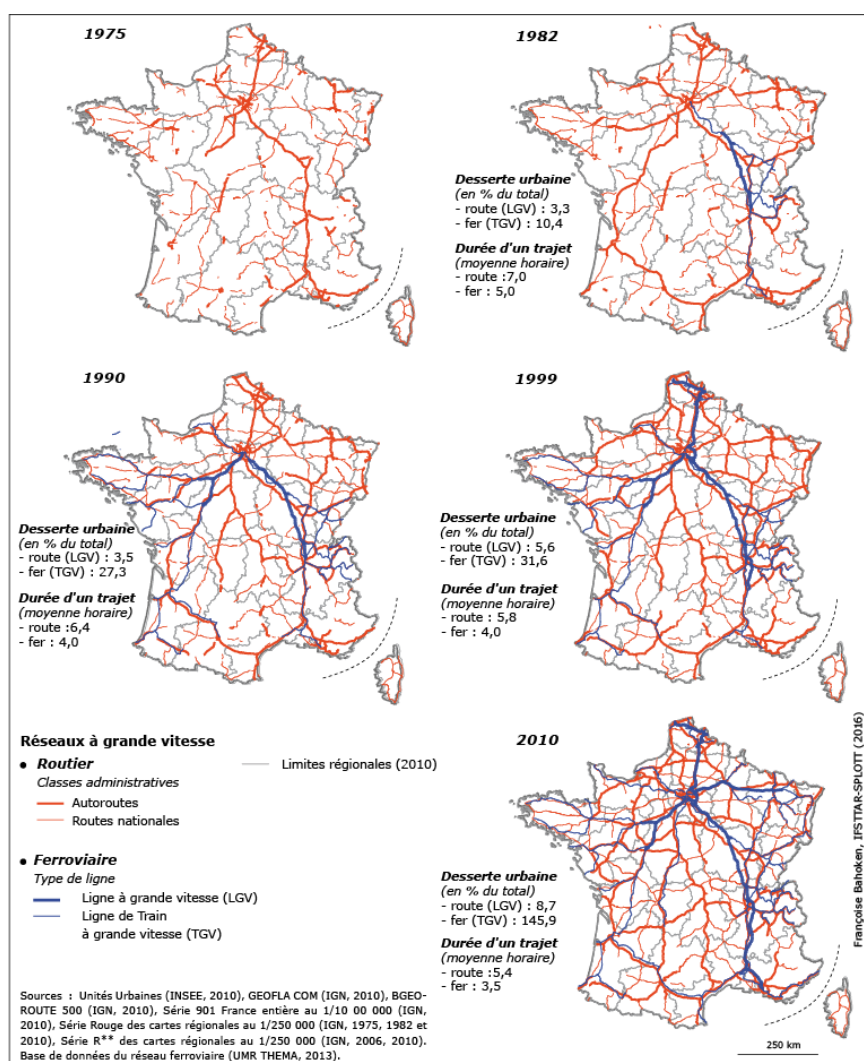


Figure 3. Evolution des réseaux routiers et ferroviaires de 1975 et 2010

BASECOGV, une base de données géo historique sur les réseaux à grande vitesse 10

On observe une césure initiale de la France qui s'estompe avec le temps. Les UU de Paris de Lyon et de Marseille sont en effet connectées au réseau autoroutier dès 1975 et au réseau TGV à partir de 1981. Ces réseaux sont ensuite étendus vers le nord (avec l'autoroute A1 vers Lille et la LGV Nord) et encore plus à l'est (avec l'autoroute A4 Metz-Nancy et LGV Est-européenne) tandis que, dans le même temps, les lignes rapides de l'ouest du pays demeurent à l'état de projet (les autoroutes A10-A81 vers Rennes, A36 de Beaune à Mulhouse ainsi que la LGV Atlantique et le TGV Bordeaux à Perpignan).

3. La construction de matrices de distances-temps sur réseaux

Dans le cadre de BASECOGV, l'analyse économétrique visait à mettre en relation les niveaux d'emplois au sein des UU avec des indicateurs d'accessibilité aux emplois et aux aménités. C'est pourquoi il a été nécessaire de calculer des distances-temps de parcours sur les réseaux, aux différentes dates. Pour ce faire, il a été nécessaire de transformer les réseaux en graphes ; la deuxième étape étant celle du calcul d'un plus court chemin sur ces graphes.

3.1. Des réseaux de transport aux graphes spatiaux

Le calcul de distances parcourues sur un réseau est une opération souvent réalisée pour déterminer un itinéraire optimal, généralement le plus court, en empruntant un système de transport donné. L'approche s'inscrivant dans le cadre d'analyse de la théorie des graphes, le réseau doit être transformé en un graphe spatialisé.

3.1.1. La construction de graphes spatiaux

Définition du graphe spatialisé

Le graphe spatialisé simple $(G)=(N, L)$, est un objet mathématique formé d'un ensemble N de couples de nœuds (n) , d'origine (i) et de destination (j) . Ces N nœuds sont mis en relation par des liens (L) , au sein d'un graphe qui n'est pas nécessairement connexe.

Pour tout $(i) \neq (j)$

$L \subset \{(i, j) \mid i, j \in N\}$

Le graphe issu d'un réseau de transport est souvent orienté (i, j) et valué, ce qui signifie que des attributs supplémentaires (w) sont associés à la description des arcs.

Ainsi, $(G)=(N, L, w)$ ou (w) est un attribut du couple de lieux (i, j) , une mesure de longueur du lien, de vitesse ou de coût de transport, par exemple. Cette mesure caractérise une fonction de poids associée au lien (L) qui va pondérer la mesure totale de distance parcourue.

$w : L \rightarrow R$

Le passage du réseau au graphe est une opération réalisée automatiquement, fondée sur la topologie et la sémantique des réseaux. L'approche majoritairement

visuelle fait apparaître des lacunes ponctuelles (tronçons superposés, tronçons pendants...) qui ont été corrigées manuellement².

Afin de garantir la connexité du graphe et la connectivité de l'ensemble des UU à au moins un réseau, un raccordement de l'UU au tronçon (routier ou ferroviaire) le plus proche de son barycentre a été réalisé automatiquement et manuellement de sorte que les mesures de distances puissent être calculées en minimisant les erreurs.

Définition du cheminement dans le graphe

Le cheminement ou chaîne $c(i, w)$ définit une suite consécutive (un chemin, un itinéraire) et finie de tronçons permettant de relier (i) à (j) , comme illustré sur la Figure 4,

$$\begin{aligned} c(i,j) &= \{ n_0 ; n_1 ; \dots ; n_n \} \\ &= \{ (i_1, j_1) ; (i_2, j_2) ; \dots ; (i_n, j_n) \} \end{aligned}$$

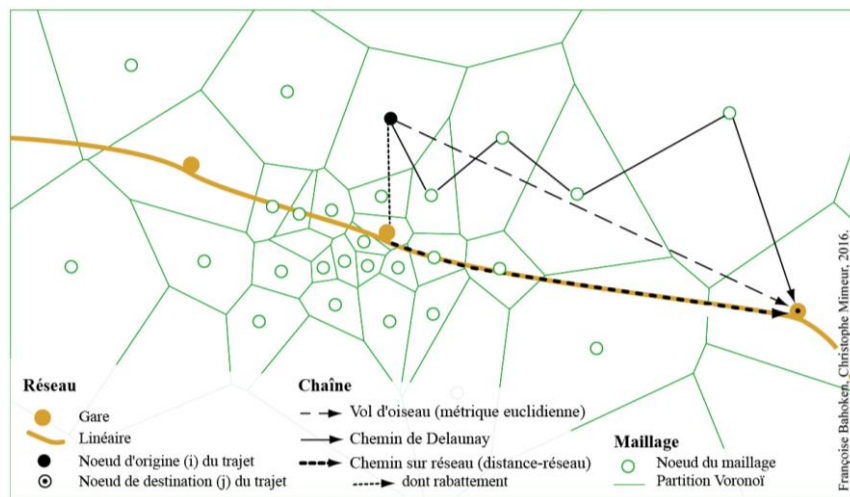


Figure 3. Illustration de possibilités de cheminement dans le graphe

D'après la Figure 4, différents algorithmes de cheminement dans un graphe existent. Notre objectif de calculer un plus court chemin, soit une acception de la distance minimale parcourue entre (i) et (j) , nous impose le recours à un graphe planaire spatial. Plusieurs acceptions de la distance sont envisageables, selon la manière dont l'espace d'étude est appréhendé (sous une forme discrète ou continue) et l'acceptation des déformations formelles correspondantes de la distance retenue par rapport à la réalité. D'après la revue de littérature proposée par J.-M. Huriot et J. Perreur, la métrique (Dij), comme distance de (i) et (j) qualifie la fonction (de

² Par exemple, pour les années 1975 et 1982, 7 UU n'étaient pas connectées au réseau routier. Pour le réseau ferroviaire, 4 UU ne l'étaient pas en 1975 et 1982 et 3 UU pour les années antérieures.

distance) et la valeur d'espacement, la première nécessitant que quatre conditions³ soient remplies.

Parmi les différentes méthodes de calcul des itinéraires, notre choix s'est porté sur l'algorithme de Dijkstra-Moore (1959), généralement utilisé dans le calcul des itinéraires routiers, pour un graphe connexe valué ou non. Ce choix se justifie par sa robustesse et son efficacité pour calculer des itinéraires sur des réseaux spatiaux, quelle que soit la mesure de distance considérée.

3.1.2. Les outils disponibles, le choix de H2Network pour OrbiGis

Divers outils permettent le calcul de parcours dans un graphe et la génération des matrices OD, mais tous ne sont pas adaptés à nos besoins : le calcul de distances sur des données massives, non sélectionnées *a priori*, la restitution de fichiers cartographiques et des matrices OD correspondantes.

Nombre de SIG intègrent aujourd'hui des modules de cheminements dans des graphes et le calcul plus ou moins aisé de distances sur réseaux⁴. Ces extensions permettent la construction (et/ou la vérification pour un fichier réseau importé) d'une structure topologique de graphe à partir d'une couche réseau (un *shapefile*), la vérification de sa géométrie, la suppression des lacunes, la vérification de la connexité, de manière à ce que le cheminement puisse être calculé sur tout ou partie du graphe. D'autre part, elles permettent le calcul de plus courts chemins kilométriques ou temporels, en fonction de critères complémentaires de la table des attributs (la longueur des tronçons par exemple).

Notre choix s'est porté sur *H2Network X* (Bocher, E, Petit, G., 2014), solution comparable sur le plan technique aux possibilités de QGIS. L'outil procure un environnement de développement riche sous OrbisGIS, grâce à ses bibliothèques de fonctionnalités d'analyse spatiale et de géovisualisation. Les patrons d'applications (*templates* de scripts SQL) réalisés à partir de H2Gis (Gouge et al., 2014) autorisent aussi l'analyse et la gestion de graphes spatiaux, et leur combinaison avec les potentialités classiques d'un SIG. Sur le plan pratique, l'intérêt réside dans l'accès direct aux scripts formant le *distancier* IFSTTAR – IRSTV-Ecole Centrale de Nantes (Bocher et al., 2015), développé dans le cadre d'un groupe de travail du projet Belgrand – GEBD, ainsi qu'au support des développeurs pour affiner le calcul des matrices. Sur le plan méthodologique, *H2Network X* autorise l'articulation d'informations portant à la fois sur le réseau (des caractéristiques des liens et des nœuds) que sur leur contexte, c'est-à-dire l'environnement du nœud ou du tronçon.

³ Pour un ensemble N de lieux, D^2 est une fonction réelle de distance (ou métrique) si et seulement si elle satisfait aux quatre conditions suivantes : 1) non négativité ($D_{ij} \geq 0$) ; 2) identité (si $D_{ij}=0$, alors $i=j$) ; 3) symétrie ($D_{ij}=D_{ji}$) ; 4) inégalité triangulaire : $D_{ik} \leq (D_{ij} + D_{jk})$.

⁴ Les extensions les plus connues sont Chronomap© pour Mapinfo©, Network Analysis© pour Arcgis©, Odomatrix© (Hilal, 2010) ou encore TransCad©. Toutes étant payantes nous avons fait le choix de mobiliser des ressources libres et ouvertes. Trois extensions pour SIG libres sont généralement utilisées : *Pgrouting* (PostgreSQL / PostGis), *Graphe routier* (Qgis) et *H2Network* (OrbiGis).

Il est donc possible de prendre en compte des informations qui portent à la fois sur l'environnement traversé par le réseau (le type de territoire concerné, selon qu'il est situé en zone urbaine, péri urbaine, ...) que sur les attributs des tronçons (des variables de pondération des vitesses liées au type de territoires) ou des nœuds (prise en compte de l'inter modalité).

3.1.3. La construction des matrices

Etant donné l'existence du *distancier*, la construction des matrices consiste à faire tourner l'algorithme correspondant, sur un réseau routier ou ferroviaire donné, à partir d'une couche de linéaire et d'une couche surfacique (de laquelle vont être extraits les points (x,y) d'origine ou de destination). La première étape consiste à connecter des points d'OD, typiquement les barycentres des mailles pour générer le graphe à partir duquel le plus court chemin va être calculé. La procédure générale est décrite dans E. Bocher et al. (2015). A chaque itinéraire est *in fine* associé un nombre total de kilomètres parcourus sur le réseau ainsi que la durée du voyage. Les matrices correspondantes résultent de l'agrégation, par une fonction somme, des valeurs de distances (ou de durée) des différents tronçons formant l'OD. Le critère du plus court chemin entre OD portant soit sur les distances kilométriques, soit sur des temps de transport, les graphes ont fait l'objet d'un enrichissement sémantique.

3.2. L'enrichissement sémantique des graphes

L'enrichissement sémantique concerne l'ajout de caractéristiques supplémentaire à notre réseau, des variables qualitatives et quantitatives qui complètent la nomenclature des fichiers IGN.

3.2.1. L'intégration de vitesses moyennes de circulation sur les tronçons

Les tronçons routiers ont été enrichis par le calcul d'une mesure de vitesse de déplacement. La vitesse variant nécessairement selon la classe de la route (autoroute, route nationale, ...) et le moment de la journée (heures de pointe, heures creuses) nous avons utilisé deux familles de critères : les paramètres définis par M. Hillal (2010)⁵ dans Odomatrix© et les attributs GEOROUTE500©.

Nous avons donc estimé la vitesse en termes d'heures creuses ou pleines, à partir des attributs 'Vocation' et 'type de voie' des fichiers IGN. Les vitesses ainsi calculées ont ensuite été pondérées en considérant 8 heures de pointe (6-10h et 16-20h) et 16 heures creuses. Si la plage des heures pleines peut apparaître large, nous

⁵ Les vitesses de circulation estimées par M. Hilal utilisent des paramètres liés au type de voie et à l'environnement de l'infrastructure routière. Cette pondération se justifie par le fait que, pour un tronçon donné, la vitesse moyenne de circulation est en pratique plus faible que la vitesse légale autorisée dans l'environnement concerné. L'auteur mobilise les trois critères suivants : l'environnement, interprété comme la position de la commune dans une AU (au sens de l'INSEE), par exemple, dans la commune centre ; la tranche de population du pôle urbain et le type de voie routière.

avons préféré sous-estimer les vitesses routières plutôt que de les surestimer, la vitesse moyenne sur un axe routier était rarement égale au maximum légal autorisé. Le tableau 4 présente l'évolution des vitesses moyennes sur les deux types de réseaux, en fonction des classes administratives.

Ces vitesses moyennes sont pondérées par la longueur des tronçons, car les bretelles d'accès aux autoroutes, souvent situées en milieu urbain nécessitent d'être distinguées des tronçons autoroutiers de rase campagne.

Classe administrative	1975	1982	1990	1999	2010
Réseau routier					
Autoroutes	103	111	114	116	117
Routes nationales	83	73	83	82	83
Autres routes	64	56	64	64	65
Ensemble	70	64	73	74	75
Réseau ferroviaire					
LGV	-	178	221	207	202
TGV	-	113	127	134	174
Autres voies ferrées	88	96	103	111	106
Ensemble	88	98	111	121	132

Source : BASECOGV (2015).

Tableau 4. *Vitesses (en km/h) pondérées par la longueur des tronçons*

3.2.2. La pénalité temporelle des « 200 kilomètres/30 minutes » pour le fer

Les premiers calculs des temps de parcours réalisés par voie ferroviaire se sont avérés très éloignés de la réalité, du fait des modalités spécifiques des voyages réalisés en train. L'application directe du principe de mesure du « plus court chemin » sur le graphe ne s'est pas révélée pertinente, les voyages en trains étant fréquemment soumis à des ruptures de charges, à l'inverse des déplacements par la route.

A défaut d'avoir su modéliser finement, et autrement, les temps imputables aux ruptures de charge ou d'attente en gare, nous avons défini une pénalité de retard aux longs trajets (donc hors TGV), selon une règle des « 200 kilomètres/30 minutes » (Koning et al., 2015). Ainsi, dès qu'un déplacement en train présente une portée supérieure à 200 kilomètres, nous lui avons ajouté 30 minutes de pénalité par tranche de 200 kilomètres. L'exception des TGV permet de limiter la pénalisation des dessertes à très longue distance, tout en garantissant une bonne approximation des durées globales des voyages interurbains.

3.2.3. Les mesures de distances temporelles disponibles

L'analyse des déplacements interurbains entre les 231 paires d'UU est obtenue à partir de matrices OD carrées et fermées (231*231), dont la construction s'inscrit dans deux grandes familles de distances : kilométriques ou temporelles. Trois types de mesures temporelles sont ici proposées : la durée du parcours 1) sur le réseau routier, 2) la durée de parcours sur le réseau ferroviaire, avec les pénalités liées aux éventuelles interconnexions et 3) la durée minimale de parcours pour une OD donnée entre les réseaux routiers et ferroviaires. Les durées globales de déplacements sont présentées dans le Tableau 5.

Temps de parcours	1975	1982	1990	1999	2010
Par la route (en heures)	7.9 (1.5)	7,0 (1,2)	6,4 (1,1)	5,8 (0,9)	5,4 (0,8)
Temps train (en heures)	8.3 (1.5)	6,3 (1,2)	5,7 (1,1)	5,3 (1,0)	4,8 (0,9)
Temps minimum (en heures)	7.5 (1.4)	6,2 (1,1)	5,6 (1,1)	5,1 (1,0)	4,7 (0,9)
Avantage route (en %)	28.2 (44.9)	27,5 (19,9)	23,4 (17,4)	26,4 (17,5)	21,6 (16,1)

Les écarts-types sont entre parenthèses.

Source : BASECOGV (2015).

Tableau 5. *Evolution des durées de parcours interurbains (en heures) entre 1975 et 2010*

Quel que soit l'indicateur considéré, on observe les temps de parcours interurbains ont considérablement baissé entre 1975 et 2010 (de -42% à -31%). Ce résultat s'explique par les investissements publics réalisés ces dernières décennies pour le développement des infrastructures de transport à grande vitesse, aussi par la manifestation d'externalités de réseaux, autrement dit par l'augmentation mécanique des bénéfices imputables à la présence d'un réseau à grande vitesse, en lien justement avec l'augmentation de sa densité.

Pour l'année 2010, on observe un avantage systématique des parcours réalisés par voie mode ferroviaire (voir Tableau 5) : la durée moyenne d'un déplacement en train est de 4,8 heures, tandis que le temps de déplacement en voiture est de 5,4 heures. Malgré la pénalité des « 200 kilomètres/30 minutes », qui a entraîné une augmentation de 37% en moyenne de la durée de voyages par le train, on n'observe donc pas de préférence massive pour les trajets en automobile, la route n'étant privilégiée que pour 22 à 28% des liaisons. La comparaison de ce résultat, avec les pratiques réelles des voyageurs réalisées à longues distances sur le territoire français valide alors l'hypothèse générale selon laquelle la composante temporelle (la durée du voyage) du coût généralisé des déplacements (i.e. du coût réel de déplacement sur lequel les individus sont supposés baser leurs choix modaux), n'explique qu'une partie des choix de mobilité individuels. Autrement dit, notre SIG-H devrait dans le

futur inclure des éléments sur les dépenses monétaires liées aux mobilités individuelles.

4. Premières analyses des performances comparées (route/fer) des parcours interurbains

Pour présenter l'intérêt de ce SIGH, nous proposons une courte analyse descriptive des performances des différentes possibilités de déplacement interurbaines. Des analyses complémentaires sont disponibles dans Notot (2015), et dans Bahoken et al. (2016). Il est tout aussi intéressant d'analyser l'évolution de la connectivité des 231 UU analysées aux différents réseaux de transport, en lien avec l'évolution des temps de déplacements qui en découle (voir Tableau 6).

Mode de desserte des UU Temps de déplacement	Autoroutes		LGV		TGV	
	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non
Par la route (heures)	5,8 (1,0)	6,9 (1,2)	5,2 (0,6)	6,2 (1,2)	6,0 (1,0)	6,2 (1,2)
Temps train (heures)	5,3 (1,1)	6,1 (1,3)	4,3 (0,5)	5,5 (1,2)	5,3 (1,0)	5,6 (1,3)
Temps minimum (heures)	5,1 (1,0)	6,0 (1,2)	4,2 (0,5)	5,4 (1,1)	5,2 (1,0)	5,5 (1,2)

Les écarts-types sont entre parenthèses. Les trajets considèrent les pénalités temporelles pour les interconnexions en gare, pour le mode ferroviaire.

Source : BASECOGV, 2015.

Tableau 6. Différences de temps de parcours selon la connectivité aux réseaux

Si 52% des territoires urbains étaient reliés au réseau autoroutier en 1982, on observe que plus de 90% le sont désormais en 2010. Cela souligne, une fois de plus, l'incroyable (densification du) maillage du réseau routier français. Pour ce qui est des LGV ferroviaires, elles sont finalement peu nombreuses puisqu'elles ne concernent que 9% de l'échantillon en 2010. En dépit des nombreux investissements dont elles ont pu faire l'objet, peu d'espaces géographiques apparaissent en être dotés et, de fait, bénéficieraient de leurs supposés bienfaits sur le développement socio-économique local. Ce constat mérite toutefois d'être nuancé, par la prise en compte de l'ensemble des UU accueillant des TGV, que ces derniers circulent sur des lignes dédiées ou sur des voies ferrées classiques (ce qui est le cas pour une partie non négligeable de leurs déplacements) : on observe d'ailleurs que la part des UU desservies par un TGV est passée de 10% en 1982 à 46% en 2010.

Les temps de parcours moyens apparaissent assez différenciés selon que les UU ont accès à un réseau à grande vitesse ou non. Les UU desservies par des autoroutes présentent des durées moyennes de voyages de 5,8 heures, contre 6,9 heures pour les autres. Pour les UU connectées au réseau de LGV, les temps de parcours sont à peine inférieurs : de 5,2 heures (et 6,2 heures pour les non connectées). En fait, seule

la connexion (ou non) au réseau TGV semble jouer un vrai rôle dans la réduction des temps de déplacements.

Cependant, en dépit d'une connectivité aux réseaux de transports bien plus forte pour les très grandes UU (60% d'entre elles sont desservies par TGV sur la période 1982-2010 : 93% par autoroutes et 11% par LGV), les différences des temps de parcours moyens ne sont pas très importantes par rapport aux autres UU. Certes, les UU de 200 000 habitants et plus en 2010 mettent systématiquement moins de temps pour relier les autres territoires, mais les écarts ne sont pas si prononcés que cela. En effet, les temps de parcours estimés sur ces réseaux contemporains sont corrélés à 75% avec les estimations réalisés sur des réseaux historiques (XIX^{ème} siècle).

5. Conclusion

L'innovation apportée par ce SIGH porte sur l'extension spatiale et temporelle de ces données et sur la bi-modalité : la base de données peut en effet faire l'objet d'analyses réalisées sur le temps long, en combinant transport ferroviaire et routier pour cette partie contemporaine. L'analyse menée sur les paires d'UU n'est pas limitative, il est tout à fait possible de refaire les calculs similaires sur un autre jeu de données, à la seule condition que les nouvelles localités considérées soient physiquement connectées au réseau analysé. Des travaux non publiés ont d'ailleurs été réalisés en ce sens sur des réseaux de poste et des réseaux de voies romaines. BASECOGV décrit non pas la demande de transports interurbains, mais uniquement l'offre potentielle de transport inter urbains à grande vitesse. Il pourrait être intéressant de complexifier l'offre par la fréquence de desserte et d'envisager la demande à partir de nouvelles sources, historiques et contemporaines. De même que la sémantique de ces réseaux pourrait être enrichie par des données concernant la demande de transport, idéalement, les effectifs de voyageurs (ou de fret) qui pourraient être reconstitués pour chacun des itinéraires.

Cela étant, des analyses spatio-temporelles sont actuellement envisagées sur les graphes spatiaux. Deux directions sont actuellement privilégiées : d'une part, la caractérisation de la structure de ces réseaux à l'aide d'indicateurs dédiés issus de la théorie des graphes ; d'autre part, une analyse spatio-temporelle visant à mettre en perspective l'évolution des changements structurels du réseau à grande vitesse, à partir de l'appréhension du réseau ferroviaire historique constitué au XIX^{ème} siècle. Cela permettrait en outre de tester certaines variables instrumentales sur un temps long.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Vivien Notot, stagiaire en L3Pro Carthagéo, ENSG-Université Paris 1 (2013-2014) ; Carlos Olarte-Bacarès, Chargé de Recherche IFSTTAR sous contrat (2014-2015) et Olivier Bonin (Chargé de recherche IFSTTAR), pour l'aide à la construction de la base de données.

6. Bibliographie

Bahoken, F., Koning, M., Mimeur, C., Olarte-Bacares, C., Thevenin, T. (2016), Les temps de parcours interurbains en France : une analyse géo-historique, *Transports*, n°495, pp. 17 -25.

Bocher E., Petit, G. (2014), *H2Network : un outil pour la modélisation et l'analyse de graphes dans le système d'Information Géographique OrbisGIS*, rapport du Lot 92 – GEBD Grand Equipement Bases de données J11-06, 92 p.

Dancoisne, P., 1984. *Théorie des graphes et constitution du réseau ferré français*. Paris I - Sorbonne, Paris.

Dupuy, G., Stransky, V., 1996. Cities and highway networks in Europe. *Journal of Transport Geography*, 4, pp. 107–121.

Dijkstra, E. W. (1959), A note on two problems in connexion with graphs, in *Numerische Mathematik*, n°1, pp. 269-271.

Facchinetti-Mannone, V., Bavoux, J.-J. (2010), L'implantation des gares TGV en France : tensions interscalaires, jeux d'acteurs et recompositions spatiales, *Belgeo. Revue belge de géographie* 9–22. doi:10.4000/belgeo.6638

Gregory, I.N., Ell, P.S. (2007) Historical GIS: technologies, methodologies, and scholarship. *Cambridge University Press*.

Kasraian, D., Maat, K., Stead, D., van Wee, B. (2016) Long-term impacts of transport infrastructure networks on land-use change: an international review of empirical studies. *Transport Reviews*, pp.1-21.

Ollivro, J. (2000) L'homme à toutes vitesses: de la lenteur homogène à la rapidité différenciée. *Presses universitaires de Rennes*, Rennes.

Gouge, A., Bocher, E., Fortin, N., Petit, G. (2014), H2Network: A tool for understanding the influence of urban mobility plans (UMP) on spatial accessibility, in: *Proceedings of the 3rd Open Geospatial Research & Education symposium*.

Hilal, M. (2010), ODOMATRIX. Calcul de distances routières intercommunales, in: *Cahier des Techniques de l'INRA*, Numéro spécial « Méthodes et outils de traitement des données en sciences sociales. Retours d'expériences », pp. 41-63.

Huriot, J.-M., Perreur, J., *Distances, espaces et représentations : une revue*, Document de travail, Institut de Mathématiques Economiques, 35 p.

Thevenin, T., Schwartz, R., Sapet, L (2013), Mapping the Distortions in Time and Space: The French Railway Network 1830 – 1930, Historical Methods, in: *Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*, n°46, pp. 134-143.

Koning M., Bahoken F., Bazin Benoit S., Beckerich C., Blanquart C., Delaplace M., Joignaux G., Savy M. (2015) *BASECOGV – Dessertes TGV et dynamiques économiques locales : un éclairage à partir de la distinction entre territoires productifs, résidentiels ou intermédiaires*, Rapport de recherche pour le PREDIT, 197 p.

Notot, V. (2014), *Cartographie des retombées économiques indirectes de l'implantation des lignes à grande vitesse, intégration et analyse de données d'études dans un SIG*, Rapport de stage de fin d'études, Licence 3 Professionnelle Géomatique et Environnement, ENSG, 48 p.