



HAL
open science

Croissance et décroissance des réseaux

Laurent Beauguitte

► **To cite this version:**

Laurent Beauguitte. Croissance et décroissance des réseaux. Laurent Beauguitte. Groupe fmr, pp.140, 2014. <halshs-01068589>

HAL Id: halshs-01068589

<https://shs.hal.science/halshs-01068589v1>

Submitted on 26 Sep 2014

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.

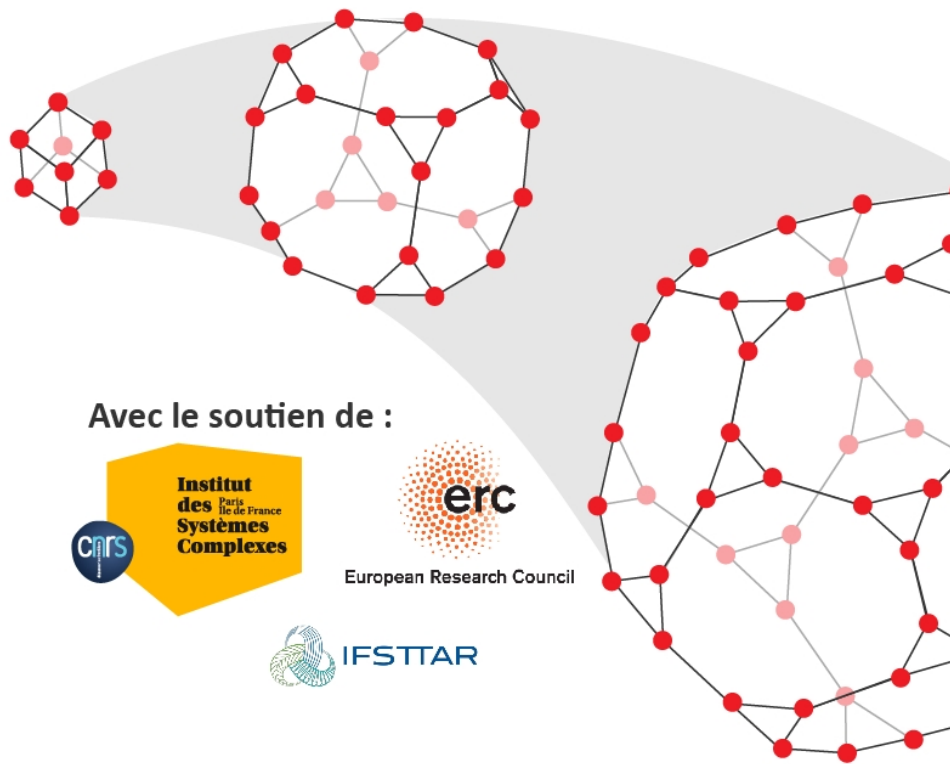


HAL Authorization

Croissance et décroissance des réseaux

Actes de la troisième journée d'étude du groupe fmr

coordonnés par Laurent Beauguitte



Paris, 25 septembre 2014

Cette journée d'études a été rendue possible grâce au soutien de l'Institut des Systèmes Complexes, du CNRS, de l'IFSTARR et de l'*European Research Council*.

Comité scientifique : Françoise Bahoken, Laurent Beauguitte, Matthieu Dreville, César Ducruet, Serge Lhomme et Marion Maisonobe

Coordinateur : Laurent Beauguitte

Pour citer cette publication :

Laurent Beauguitte (coord.), 2014, *Croissance et décroissance des réseaux*, Paris, Actes de la troisième journée d'études du groupe fmr (flux, matrices, réseaux), <http://halshs.archives-ouvertes.fr/FMR/>.

Table des matières

Résumés	4
Abstracts	8
Actes	12
C. Lagesse, P. Bordin et S. Douady, Méthodologie de caractérisation du réseau viaire à travers la construction d'un objet complexe et d'indicateurs liés	12
A. Béziat et A. Beitz, La planification francilienne au prisme de l'évolution de l'accessibilité par le réseau ferré : décalage entre ambitions et réalisations	28
J. Prud'homme, Des flux origine-destination aux déplacements : des différences de quantités de polluants émises selon le réseau routier	44
S. Sadoux et T. Meehan, Vers une typologie des inversions urbaines par l'infrastructure. L'exemple de Detroit, Michigan	59
V. Lefebvre, Proposition d'approche méthodologique pour l'analyse des Réseaux Formels d'Entrepreneurs	86
A. Palle, Les dynamiques d'évolution des réseaux d'électricité européens, des réseaux techniques entre croissance et décroissance	97
O. Bonin, Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques	107
Bibliographie	134
Liste des figures	137
Liste des tableaux	138
Auteur-e-s	139

Résumés et mots clés

Claire LAGESSE, Patricia BORDIN et Stéphane DOUADY, *Méthodologie de caractérisation du réseau viaire à travers la construction d'un objet complexe et d'indicateurs liés*

Résumé : Les réseaux spatiaux se distinguent des réseaux classiques de par leur matérialité géographique. Afin de permettre leur analyse, nous construisons un objet complexe - la *voie* - à partir de leurs propriétés topologiques et topographiques. Nous expliciterons ici le développement de cinq indicateurs liés à la *voie* : la *connectivité*, la *structuralité*, l'*espacement*, la *maillance* et la *perpendicularité*. Ceux-ci nous permettent de faire ressortir une hiérarchie entre les liens, une superstructure de l'espace et des sous-ensembles révélateurs d'une morphogenèse. En appliquant notre raisonnement aux réseaux viaires, nous parvenons à retracer leur Histoire. Nos terrains vont de Paris (paysage urbain dense) à Manaus (ville brésilienne contrastée). Nous montrons qu'il est ainsi possible de faire une analyse multi-échelle, robuste et indépendante des frontières d'un réseau spatial à travers sa géométrie.

Mots clés : Réseau viaire, Théorie des graphes, Analyse spatiale, Modélisation urbaine, Systèmes complexes, Morphogenèse

Adrien BÉZIAT et Adeline HEITZ, *La planification francilienne au prisme de l'évolution de l'accessibilité par le réseau ferré : décalage entre ambitions et réalisations*

Résumé : Les documents de planification de la région Île-de-France qui se sont succédés depuis les années 1960 ont fait la part belle à l'aménagement des réseaux de transports. L'évolution de ces réseaux reflète d'une certaine manière les efforts consentis en matière de développement territorial. L'objectif de notre communication est de mesurer la croissance du réseau ferroviaire francilien et de l'accessibilité de ses gares. Cette mesure, à plusieurs années (1975, 1990, 2014 et 2035), passera par le calcul d'indices d'accessibilité utilisant la théorie des graphes. Cette analyse historique nous permettra de jeter un regard nouveau sur ces documents de planification afin d'en analyser les ambitions, les réussites et les échecs.

Mots clés : Accessibilité, Planification, Réseau ferré, Île-de-France

Julie PRUD'HOMME, *Des flux origine-destination aux déplacements : des différences de quantités de polluants émises selon le réseau routier*

Résumé : Le réseau routier est un élément communément considéré comme simple support dans les diagnostics territoriaux. Ce texte a pour objectif de

le mettre au centre des analyses de la pollution de l'air urbain, comme une variable à part entière dans la question des émissions de polluants par la circulation routière. Nous présentons ici la manière dont il contraint la matérialisation d'un réseau d'origine-destination en un réseau de déplacements. La taille de ce dernier est conditionnée par les caractéristiques (géométrie et vitesses) du réseau routier considéré. Les distances parcourues, et ainsi les émissions de polluants, y sont donc très fortement liées.

Mots clés : Réseau de flux origine-destination, Réseau de déplacements, Réseau routier, Distances parcourues, Émissions de polluants

Stéphane SADOUX et Tricia MEEHAN, *Vers une typologie des inversions urbaines par l'infrastructure. L'exemple de Detroit, Michigan*

Résumé : Les images du déclin de Detroit véhiculées par les médias racontent une histoire partielle. Ce *ruin porn*, comme l'appellent les locaux, s'intéresse uniquement au délabrement des infrastructures et du bâti de certains quartiers, et tend à occulter une autre réalité : celle d'un renouvellement incrémental mais bien réel, le plus souvent basé sur des initiatives de la société civile plus que des administrations asphyxiées qui ont progressivement perdu leur prérogatives. Pour la ville comme pour les résidents, le dilemme porte sur les manières de maintenir des infrastructures conçues pour 2 millions d'habitants alors qu'il en reste aujourd'hui 700 000 et que la plupart sont regroupés dans des « villages urbains ».

Cet article s'intéresse à des initiatives actuelles nées de nouvelles formes de l'action publique fondées sur le *rightsizing* de l'infrastructure de la ville. Après avoir situé cette notion dans les débats plus larges sur l'infrastructure et la décroissance urbaine, nous examinerons les stratégies de *rightsizing* proposé par le *Detroit Framework Plan* de 2012, dont certaines visent l'inversion urbaine pour reprendre l'expression d'Alan Ehrenhalt (2012). Parmi les cinq stratégies proposées par le *Detroit Framework Plan*, trois ne seront pas discutées ici : elles représentent à bien des égards un *status quo* en termes d'usages et de fonctions dans les zones moins frappées par la vacance. Notre contribution se concentre plutôt sur les deux autres stratégies pouvant être qualifiées d'« infrastructurécotomie » visant à réduire le coût de maintenance de l'infrastructure dans les zones de forte vacance : la première vise à réduire l'infrastructure, la seconde à la remplacer, la réaffecter ou la déclasser.

L'application potentielle de ces idées sur un terrain précis est par la suite examinée à travers un projet sous étude depuis la fin des années 1970 à *Bloody Run Creek*, cherchant à inciter le réaménagement de *Central East Detroit* qui souffre actuellement d'un fort taux de vacance, et qui fait figure de vedette du *ruin porn*. Ce projet partage trois grands objectifs avec le

Detroit Framework Plan : il considère en premier lieu le paysage comme une forme d'infrastructure permettant de réduire le besoin de l'infrastructure « traditionnelle » ; il utilise en second lieu le paysage comme une façon de mieux relier les villages urbains, souvent isolées ; enfin, il vise à diversifier les modes de transport disponibles pour une population qui, lorsqu'elle ne dispose pas d'une automobile, est aujourd'hui contrainte à l'immobilité.

Mots clés : Infrastructure, Inversion urbaine, Décroissance, *Rightsizing*, Infrastructure bleue et verte, *Bloody Run Creek*, Detroit

Vincent LEFEBVRE, *Proposition d'approche méthodologique pour l'analyse des réseaux formels d'entrepreneurs*

Résumé : Depuis une vingtaine d'années, la littérature entrepreneuriale étudie le(s) réseau(x) de l'entrepreneur, identifié(s) comme un levier majeur du succès des nouvelles entreprises. Cependant, les travaux rencontrent quelques difficultés méthodologiques parmi lesquelles celles concernant les trois enjeux suivants : la définition de l'objet étudié, la nature de l'analyse et l'ancrage méthodologique. Ce papier a pour objectif de proposer une méthodologie permettant d'étudier les réseaux formels d'entrepreneurs tout en prenant en compte ces trois enjeux. Au travers de cette approche, nous espérons contribuer à la consolidation des recherches consacrées aux réseaux formels de l'entrepreneur, dans la lignée des recommandations de Sarah Jack (2010).

Mots clés : Réseau Formel, Entrepreneur, Méthodologie

Angélique PALLE, *Les dynamiques d'évolution des réseaux électriques européens, des réseaux techniques entre croissance et décroissance*

Résumé : Le développement des sources de production d'énergies renouvelables combiné à la politique d'intégration européenne des marchés de l'électricité génère une pression sur les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Ceux-ci doivent s'adapter à de nouvelles contraintes de fonctionnement qui demandent plus de flexibilité de leur part. Les réponses des réseaux à ce besoin d'adaptation sont multiples et diffèrent selon l'échelle à laquelle on les aborde. À l'échelle européenne, la tendance est à la croissance et au développement des réseaux qui permettent de connecter les nouvelles sources renouvelables et d'interconnecter les États, mais à l'échelon local existent également des dynamiques de décroissance de ces réseaux, rendues possible par l'intégration des technologies de gestion et de communication numériques au fonctionnement du réseau.

Mots clés : Réseaux, Énergie, Europe.

Olivier BONIN, *Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques*

Résumé : L'analyse de l'évolution des réseaux de transport peut se faire par des méthodes issues de la théorie des graphes, 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 plus qu'une simple image, il est nécessaire de prendre en compte explicitement la relation de modélisation à différentes époques 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

Abstracts and keywords

Claire LAGESSE, Patricia BORDIN and Stéphane DOUADY, *A complex object to characterize road network through linked indicators*

Abstract : Among networks, space networks have a very typical property linked to their geometry. Joined to topology, topography lead to the construction of one complex object revealing the network constitution : the *way*. By developing appropriated mathematical indicators, a hierarchy, a space superstructure and subsets are set between edges, highlighting a morphogenesis. Five of them will be detailed here : *connectivity, structurality, spacing, meshing* and *perpendicularity*. By applying our method to roads network we can retrace the History of a space. Our grounds go from Paris (France) to Manaus (Brazil). It is then possible to make a scale-free, robust and borders-free analyse of space network through its geometry.

Keywords : Road network, Graph theory, Spatial analysis, Urban modelling, Complex systems, Morphogenesis

Adrien BÉZIAT and Adeline HEITZ, *The planning of the Paris Region through the prism of changes in accessibility level of the railway network. Gaps between ambitions and achievements*

Abstract : Since the 1960's, the successive spatial planning documents of the Paris Region gave a particular focus to the development of the transport networks. In a way, the evolution of these networks reflects the efforts that have been made in terms of regional development. The goal of this paper is to measure the growth of the railway network of the Paris region, and the accessibility of its train stations. This measurement, done for several years (1975, 1990, 2014 and 2035), requires the calculation of an accessibility index, using the graph theory. This historical analysis will allow us to get a fresh look on these spatial planning documents, in order to analyze their ambitions, their successes, and their failures.

Keywords : Accessibility, Spatial planning, Railway network, Paris Region

Julie PRUD'HOMME, *From origin-destination flows to travels : differences in amount of exhaust emissions emitted depending to road network*

Abstract : Road network is traditionally considered as a mere support in territorial studies. This writing aims to put it at the centre of urban pollution analyses, as a full part variable to exhaust emission questioning. We present how road network constrains the materialisation of an origin-destination flows network in a travel network. The size of the latter is determined by

the road network characteristics (shape and speeds). The distances travelled, and so exhaust emissions, are closely linked to these.

Keywords : Origin-destination flows network, Travel network, Road network, Distances travelled, Exhaust emissions

Stéphane SADOUX and Tricia MEEHAN, *Towards a Typology of Urban Inversion through Infrastructure : The Example of Detroit, Michigan*

Abstract : The images of Detroit’s decline communicated by the media only tell a part of the city’s the story. This “ruin porn”, as the locals call it, is only concerned with the dilapidation of the infrastructure and buildings of certain neighborhoods, which tends in fact to overshadow another reality ; there is indeed an incremental and real renewal occurring, usually based on the initiatives of civil society rather than the asphyxiated administrations that have gradually lost their prerogatives. For the city as for the residents, the dilemma is how to economically and efficiently maintain infrastructural services with networks designed to serve almost 2 million people when today there are a little more than 700 000 inhabitants that remain, and who are for the most part grouped in what could be called urban villages.

This paper therefore looks at the current initiatives born out of new forms of public action whose objective is that of “rightsizing” the city’s infrastructure. After situating this notion within the larger debates on infrastructure and urban shrinkage, we will look at the rightsizing strategies proposed by The Detroit Framework Plan of 2012, certain which can be understood as aiming at urban inversion, as described by Alan Ehrenhalt (2012). Among the five strategies proposed by The Detroit Framework, three of them will not be discussed here ; they represent in many ways a status quo in terms of uses and functions in more stably inhabited areas. This contribution focuses instead on the other two strategies, which could be qualified as “infrastructerotomy” and which aim to alleviate the cost of maintaining infrastructure ‘as is’ in high vacancy areas : the first strategy aims at reducing the infrastructure and the second at replacing, repurposing or decommissioning it.

The potential application of these ideas on a specific terrain is then explored through a project under study since the late 1970s for the daylighting of Bloody Run Creek, seeking to spur a low density redevelopment of Central East Detroit, currently suffering from high vacancy rates, and which serves as a star of this ruin porn. This project shares three important objectives with the Detroit Framework Plan : firstly, it considers landscape as a form of infrastructure in order to reduce the “traditional” infrastructure needed ; secondly, it uses landscape as a way to better weave together the often isolated urban villages ; thirdly, it seeks to diversify transportation modes available

for a population which, when it does not access to a car, is today constrained by immobility.

Keywords : Infrastructure, Urban inversion, Urban shrinkage, Right-sizing, Blue-green infrastructure, Daylighting, Bloody Run Creek, Detroit

Vincent LEFEBVRE, *Studying formal entrepreneurial networks : A new methodological approach*

Abstract : For twenty years, the entrepreneurial literature studied network(s) of entrepreneurs. They pointed out that such networks are determinant for the success of new businesses. However, research encounter some methodological difficulties peculiarly on the following three issues : the definition of the object of study, the nature of the analysis and methodological roots. This research proposes a methodology for studying the formal networks of entrepreneurs taking into account these three issues. Through this approach, we hope to contribute to the consolidation of research on the formal networks of entrepreneurs following recommendations of Sarah Jack (2010).

Keywords : Formal Network, Entrepreneur, Methodology

Angélique PALLE, *Dynamics and evolution of European electricity networks, technical networks between growth and shrinking*

Abstract : The development of renewable sources of energy combined with the European policy of integration for the electricity market put pressure on the transport and distribution networks for electricity. They have to adapt to new constraints, which leads them to developing more flexibility. Networks answers to these challenges differ according to the scale at which one considers them. At the European level the trend goes towards the growth of these networks as it allows the connection of new renewable sources to the market and the interconnection of States, but at the local level the integration of management and communication digital technologies to the network open the possibility for shrinking dynamics.

Keywords : Networks, Energy, Europe

Olivier BONIN, *Medium-term growth analysis of transport network using cartographic sources*

Abstract : The analysis of the evolution of transport networks can be performed by methods relating to the graph 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 different times to be able to distinguish between the evolution of the territory and between the art of the cartographer, rebuilding thus a kind of critical apparatus of the map.

Keywords : Transport networks, Cartography, Historical data, Modelling, Spatial analysis

Méthodologie de caractérisation du réseau viaire à travers la construction d'un objet complexe et d'indicateurs liés

Claire LAGESSE¹, Patricia BORDIN² et Stéphane DOUADY³

Introduction

Parmi l'ensemble des réseaux, les réseaux spatiaux revêtent un caractère particulier lié à leur emprise au sol. Dans ce type de réseaux, un nœud est une intersection, un lien est un tronçon ayant une géométrie définie dans l'espace. Ces propriétés permettent la caractérisation de leurs structures et de leurs dynamiques. L'association des informations topographiques et topologiques est au fondement de notre approche mathématique pour qualifier la morphogenèse de tels réseaux.

Les graphes aux inscriptions spatiales se retrouvent dans de nombreux domaines, à des échelles très variées. Ainsi, nous pourrions étudier des graphes issus des veinures d'une feuille, d'une structure organique (gorgones) ou de craquelures sur de la céramique. Nous développons ici plus particulièrement l'application aux réseaux viaires et nous croiserons notre analyse mathématique avec le point de vue d'urbanistes et d'archéo-géographes. Nous travaillons sur les réseaux viaires de plusieurs communes aux organisations spatiales différentes : Paris, un réseau urbain dense ; Avignon et ses alentours, paysage mixte, géographiquement contraint ; Manaus, une ville brésilienne en pleine expansion, au réseau arborescent.

De nombreuses études analysent la ville à travers ses réseaux, et plus particulièrement, son réseau viaire. Les travaux en syntaxe spatiale, par exemple, se concentrent sur la continuité du réseau vue à travers ses usagers (Hillier *et al.*, 1993 [46]). Ces travaux reconstruisent ainsi des fragments de lignes droites, matérialisant les perspectives, et découpant la ville en *lignes de vue*

1. Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Matière et Systèmes Complexes (MSC)

2. Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, Cachan, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut des Énergies de Demain (IED)

3. Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Matière et Systèmes Complexes (MSC)

indépendantes de l'unité spatiale d'une rue. Dans ces recherches il est question de l'impact de la structure de la voirie sur les flux piétonniers (Hillier et Hanson, 1984 [45], Genre-Grandpierre, 2001 [41], Genre-Grandpierre et Foltête, 2003 [42]). Il est montré que la fréquence d'utilisation des tronçons routiers est liée à la configuration du réseau. Nous nous détacherons ici des lignes de perspectives pour étudier des éléments géographiques continus entre deux nœuds (intersections). En effet, lorsque les travaux de syntaxe spatiale considèrent à la fois les aspects topologiques et psychologiques (Penn, 2003 [81]) nous ne prenons en compte que les propriétés géométriques d'intersection entre tronçons de rue.

D'autres travaux inversent la modélisation de l'espace en considérant les liens comme des nœuds - chaque lien représentant une continuité de tronçons - et les nœuds comme des liens, créant ainsi le *dual* de l'espace viaire (Porta *et al.*, 2006 [84]) afin d'en étudier ses propriétés de *petit monde*. Enfin, nous pouvons également considérer les travaux récents de Barthelemy *et al.* (2013 [5]) qui, à partir de ce dual, étudient les *centralités* du réseau. Nous utiliserons les mêmes fondements que ces études, à savoir ne considérer que le filaire du réseau viaire. Cependant, nos recherches poseront l'intérêt d'associer la dimension géométrique à celle topologique⁴.

Décomposant le réseau viaire en objets élémentaires cohérents avec son emprise au sol, nous construisons un objet complexe continu : la *voie*. Cet objet a pour but de décomposer le réseau en un hypergraphe d'éléments géographiques, répondant à un critère d'alignement. Indépendante de la toponymie, la voie permet une analyse du réseau viaire indépendamment des frontières administratives. Construite uniquement sur des critères topologiques et géométriques, elle est indépendante des décisions politiques et des législations en vigueur. Elle apparaît être un élément robuste dans le temps, support pérenne à la modification des autres éléments urbains (parcelles, bâtis).

Nous verrons comment est construit cet objet complexe et nous détaillerons l'élaboration de cinq indicateurs qui nous permettent de proposer une analyse pertinente du réseau à partir de ses propriétés topographiques et to-

4. La recherche qui est présentée ici, soutenue par le CNRS dans le cadre du PIRVE (Programme Interdisciplinaire de Recherches Ville-Environnement), puis par le programme ANR « MoNuMoVi », est issue des travaux de l'équipe pluridisciplinaire MORPHOCITY, animée conjointement par P. Bonnin (CNRS-AUS-LAVUE) et S. Douady (CNRS-MS), composée de Patricia Bordin (ESTP - Géospective), Estelle Degouys (doctorante AUS-LAVUE), Clément-Noël Douady (AUS-LAVUE), Jean-Pierre Frey (CRH-LAVUE), Claire Lagesse (doctorante MSC) et Pierre Vincent (Z-Studio) et à laquelle ont participé Thomas Courtat (docteur), Magali Watteaux (post-doctorante) et Wang Xi (doctorante).

pologiques. Nous appliquerons notre étude et visualiserons nos résultats sur le réseau viaire de Paris puis nous étendrons la visualisation de l'indicateur de *structuralité* à Avignon et Manaus.

1. Construction d'un objet complexe continu : la *voie*

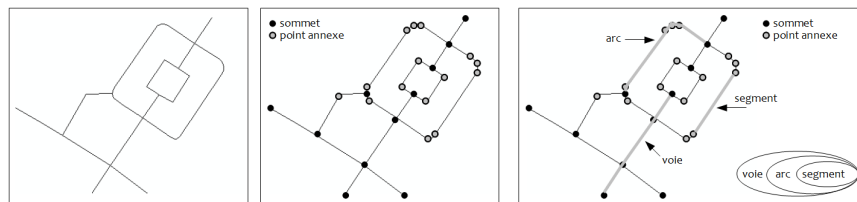
Pour permettre l'analyse approfondie d'un réseau spatial, nous commençons par le découper en unités élémentaires, afin d'extraire distinctement les informations géométriques et topologiques dont il est porteur. Nous distinguons donc dans le réseau :

- le sommet : point correspondant à une intersection (entre 3 tronçons ou plus) ou à une impasse ;
- le point annexe : point correspondant à un changement de direction ;
- le segment : au sens mathématique du terme, ligne reliant deux points annexes (ou un point annexe et un sommet) ;
- l'arc : ensemble continu des segments reliant deux sommets - l'arc possède un sommet initial, un sommet final, et un ensemble de points annexes (pouvant être nul).

Le degré d'un sommet est défini par le nombre d'arcs qui s'y rejoignent. Il peut être égal à 1 s'il s'agit d'une *impasse*.

À partir de ces unités élémentaires, nous créons un objet complexe que nous nommons la *voie* (figure 1). Elle est construite par une association d'arcs à chaque sommet. Son élaboration est donc indépendante du sens de lecture du réseau.

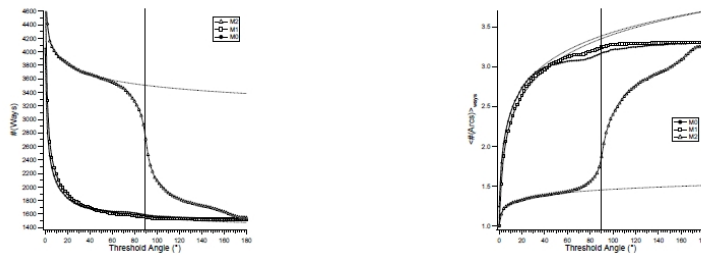
FIGURE 1 – Décomposition d'un réseau spatial en unités élémentaires et construction de la *voie*



Nous développons pour cela trois méthodes de construction. L'une favorise la ligne droite [M0], l'autre un alignement global [M1] et enfin la troisième associe les arcs de manière aléatoire, comme étalon de notre étude [M2]. Nous fixons plusieurs angles seuils afin de tester leur impact sur la continuité de notre objet. À partir de mesures physiques quantitatives, appliquées à différentes caractéristiques du réseau (angles, nombre d'arcs par

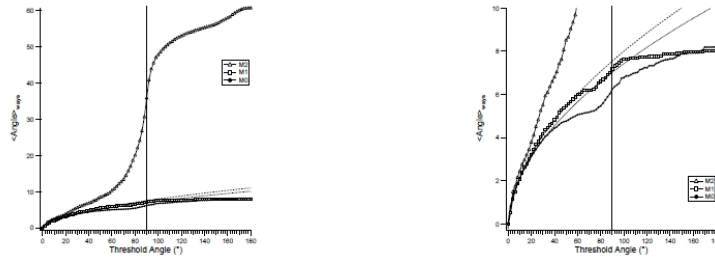
voies, longueur des voies, etc.), nous définissons les paramètres (méthode et angle seuil) nécessaires à la construction la plus appropriée. L'ensemble de cette étude ne sera pas détaillé ici, nous la résumerons à travers 4 courbes (figures 2 et 3). Elle établit que la méthode la plus efficace pour construire un objet *voie* pertinent est celle associant itérativement à chaque sommet les arcs qui s'y joignent formant le plus petit angle ([M0]) avec un angle seuil maximal de 60° . En effet, la méthode M0 est celle convergeant le plus rapidement, et l'angle seuil de 60° est celui où la courbe s'est stabilisée sans être perturbée par l'impact conséquent de l'angle seuil à 90° . Comme nous pouvons le voir sur la figure 4, cet angle est largement prédominant dans le réseau viaire.

FIGURE 2 – Nombre de voies et nombre d'arcs moyens par voie à Avignon



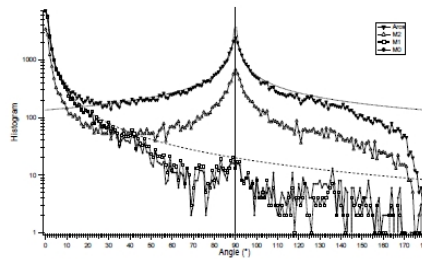
À gauche : variation du nombre de voies en fonction de l'augmentation de l'angle seuil pour les trois méthodes, pour Avignon, approximation avec une loi de puissance négative. La première méthode, M0, décroît le plus rapidement, avec un facteur 2. La méthode aléatoire, M2, décroît lentement avant de passer le seuil critique des 90° . Le même seuil à 90° est également visible, à plus petite échelle, pour les courbes de M0 et M1. À droite : étude du nombre d'arcs moyen par voies en fonction de l'angle seuil, pour Avignon, avec une approximation logarithmique. De la même manière, nous observons ici que M0 converge plus rapidement. Nous pouvons également visualiser l'impact de l'angle seuil à 90° .

FIGURE 3 – Angle moyen entre arcs le long d’une même voie tracé pour les trois méthodes en fonction de l’angle seuil choisi



À gauche : La courbe de la méthode associant les arcs aléatoirement croît rapidement et présente la même particularité autour de 90° . Elle converge vers 60° . À droite : zoom de la courbe précédente pour les petits angles seuils ; $M0$ converge rapidement vers une valeur d’angle plus petite, autour de 5° , que celle de $M1$, autour de 6° . Les deux courbes sont également affectées par l’angle seuil de 90° et convergent autour de 8° . Les croissances de $M0$ et $M1$ pour les faibles valeurs d’angle seuil sont assimilables à celle d’une fonction racine carrée (lignes en pointillés).

FIGURE 4 – Histogramme de la distribution des angles



Les différentes courbes correspondent aux arcs bruts (Arcs) et aux angles entres voies construites avec les trois différentes méthodes ($M0$, $M1$ et $M2$). Elles sont tracées pour la ville de Paris.

Le but de cette démarche est de donner une signification substantielle à notre objet et d’offrir à un public pluridisciplinaire la possibilité de s’en saisir et d’en faire un élément de référence dans des domaines différents. Ainsi, la *voie* objective le concept empirique fondé sur un sentiment de perspective avec des paramètres d’élaboration qui ont été choisis après des études statistiques exhaustives. Elle a donc une pertinence scientifique en tant qu’entité géographique.

La *voie* possède un caractère multi-échelle. En effet, elle peut traverser l’ensemble de l’échantillon comme elle peut rester cantonnée dans une partie de celui-ci. Nous avons développé des indicateurs afin d’exploiter cet aspect et de mettre en évidence les structures sous-jacentes à la géométrie du réseau. Nous montrons ainsi comment la *voie* permet une lecture globale de ses caractéristiques d’ensemble alors qu’elle a été construite uniquement en utilisant des règles locales.

2. Construction d’indicateurs appliqués à la voie

Il a été montré dans plusieurs études que le facteur métrique n’est pas suffisant pour expliciter la structure des villes (Marchand, 1974 [68] ; Foltête *et al.*, 2002 [34]). Le *chemin le plus court* n’est donc pas le seul élément caractéristique des réseaux urbains. Les changements de direction sont également un facteur important (Turner, 2001 [105] ; Conroy Dalton, 2001 [22]). Nous appliquons ce raisonnement à notre objet géographique continu, la *voie*, qui porte déjà dans sa construction l’importance de la linéarité. Nous développons des indicateurs prenant en compte le *coût du tournant*. Notre objectif est de compléter les travaux de syntaxe spatiale, qui évaluent la sensibilité des itinéraires à la structure, en caractérisant le réseau à la fois localement (en prenant en compte le voisinage direct de la voie) et globalement (en mesurant l’accessibilité de l’ensemble du réseau à partir d’une voie).

2.1 L’indicateur de *connectivité*

Le premier indicateur que nous pouvons mentionner est celui de *connectivité*. À partir d’une voie, il permet de quantifier le nombre d’arcs appartenant à une autre voie qui partage un de ses sommets.

$$connectivite(v_{ref}) = [\sum_{s \in v_{ref}} deg(s) - 2] + 2$$

En considérant le degré de connexion d’une voie, sa *connectivité*, nous observons le voisinage topologique de la voie. Cet indicateur correspond

au nombre de possibilités de tourner sur une autre voie (i.e. nombre de connexions avec les arcs des autres voies). C'est donc un attribut indépendant des frontières de l'échantillon spatial car il s'applique à chaque voie en fonction de ses connexions directes à chaque sommet. Seule une modification de l'identité de l'objet entraînera une variation de sa valeur (ajout ou suppression d'un sommet).

Observer ainsi les connexions des voies fait ressortir des structures intéressantes. En effet, si l'on se penche par exemple sur la ville de Paris (figure 5), qui s'est développée au travers des siècles autour d'un noyau central et a été complètement repensée par le Baron Haussmann au XIX^e siècle, les voies parisiennes dont l'indicateur de connectivité est le plus important sont une partie des voies anciennes d'accès à la cité. Les grandes avenues haussmanniennes sont, elles, noyées dans l'arrière-plan structuré, entrecoupées de places ou de ronds-points, moins connectées. L'analyse topologique de la voie, sans considérer l'ensemble du réseau, est donc déjà révélatrice de structures, d'ordre et d'histoire.

FIGURE 5 – Paris - Carte de *connectivité*



Plus la couleur est foncée, plus la voie possède un indice de connectivité important. Les voies anciennes ressortent ainsi qu'un arrière plan structuré.

2.2 L'indicateur de *structuralité*

Pour considérer l'importance d'un objet dans un réseau spatial, il est nécessaire d'aborder la notion de distance (Bonnin et Douady, 2013 [14]). Dans un graphe spatial, trois distances peuvent être définies :

- la distance euclidienne : longueur du segment joignant deux objets du réseau (indépendamment du réseau) ;
- la distance géographique : distance euclidienne entre deux objets du réseau en suivant le réseau (intervention des points annexes) ;
- la distance topologique : distance entre deux objets du réseau comptabilisant les objets de même nature du graphe qui sont traversés.

Ces notions de distances nous permettent de définir des parcours caractéristiques entre deux points. Ainsi, le *chemin le plus court* minimise la distance géographique entre deux objets du réseau. Nous définissons de la même manière le *chemin le plus simple* qui minimise la distance topologique entre deux voies. Il s'agit du chemin mis en évidence par Pailhous (1970 [77]) adoptant le point de vue d'un chauffeur de taxi qui cherche en priorité à se raccorder au réseau principal avant de s'en détacher pour rentrer dans un sous-réseau de distribution locale afin d'arriver à destination. Le *chemin le plus simple* est donc celui qui minimise le nombre de changements de voies.

Nous appliquons à la voie un indicateur combinant distance topologique entre les voies et distance géographique (longueur de la voie). Nous créons ainsi l'indicateur de *structuralité*, qui représente la connexion d'une voie par rapport à l'ensemble du réseau. Il est le fruit du calcul d'une distance de *simplicité* sur le réseau (distance topologique faite sur les voies combinée à la longueur de celles-ci) (Courtat *et al.*, 2011 [23]). Cet indicateur qualifie la vision de l'ensemble du réseau de chaque voie. Plus sa valeur est faible, plus la voie sera structurante : cela signifie qu'elle permet d'accéder à de nombreuses voies, dont certaines avec un linéaire important, de manière efficace (avec un minimum de changements de voie).

La *structuralité* est un indicateur complet associant les informations topologiques et topographiques offertes par le réseau. Elle est donnée pour chaque voie - dans le graphe G -, successivement placée en tant que voie de référence v_{ref} , par la somme des produits des distances topologiques des autres voies par rapport à v_{ref} et de leurs longueurs.

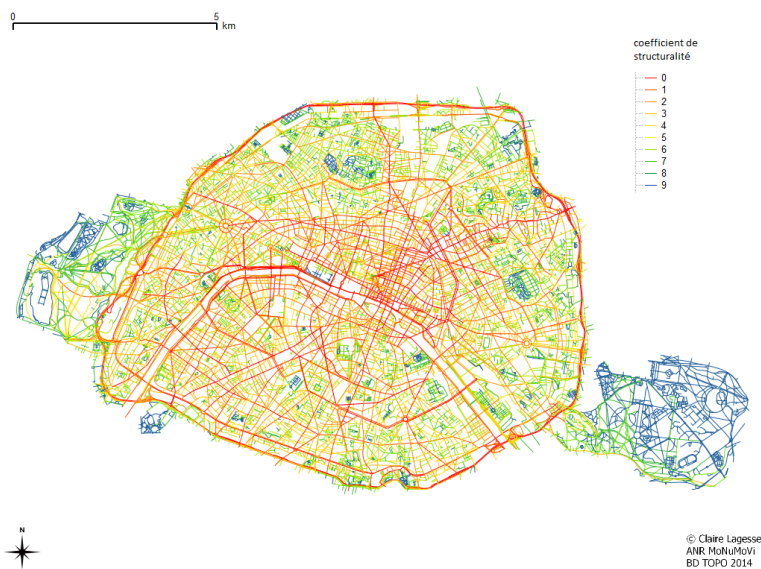
$$structuralite(v_{ref}) = \left[\sum_{v \in G} d_{simple}(v, v_{ref}) * length(v) \right]$$

Cet indicateur, appliqué à plusieurs espaces de constitutions différentes, révèle des propriétés intéressantes. Ainsi, il est robuste, à la fois dans le temps

et dans l'espace : les voies les plus structurantes dans un réseau le restent ; la hiérarchie établie entre les objets varie très peu selon le découpage de l'échantillon. De plus, l'indicateur de structuralité, en hiérarchisant les voies, fait apparaître une structure corrélée à la dynamique de développement de la ville. Cette propriété, due à une construction par fractionnement successif du réseau, se vérifie sur l'ensemble des espaces étudiés, qu'il s'agisse d'un paysage urbain dense (Paris), d'un paysage urbain mixte (Avignon et ses alentours) ou d'une ville brésilienne à la structure arborescente (Manaus).

Nous retrouvons sur la carte des voies parisiennes (figure 6) le centre historique de la ville (l'île de la Cité et sa rive droite) ainsi que la petite ceinture parisienne. Nous pouvons également y lire les radiales importantes pré-Haussmanniennes, comme la rue Saint Jacques reliant Paris au Sud, la route du Faubourg Saint Honoré - lien historique de Paris avec l'Ouest avant la construction de la rue de Rivoli en 1800 -, la rue du Faubourg Poissonnière vers le Nord, ou la rue de Belleville vers le Nord-Est (Huard, 2013 [50]).

FIGURE 6 – Indicateur de *structuralité* appliqué au réseau des *voies* de Paris



Les voies dont l'indicateur de structuralité est le plus faible minimisent le nombre de changement de voies pour accéder à l'ensemble du réseau. Elles sont donc les plus structurantes et témoignent le plus souvent de structures anciennes. Cet indicateur permet donc de hiérarchiser les voies du réseau en faisant ressortir les objets structurants. Il rend ainsi possible de retracer une partie de l'histoire de construction d'un espace.

2.3 Les indicateurs dérivés : l'*espacement* et la *maillance*

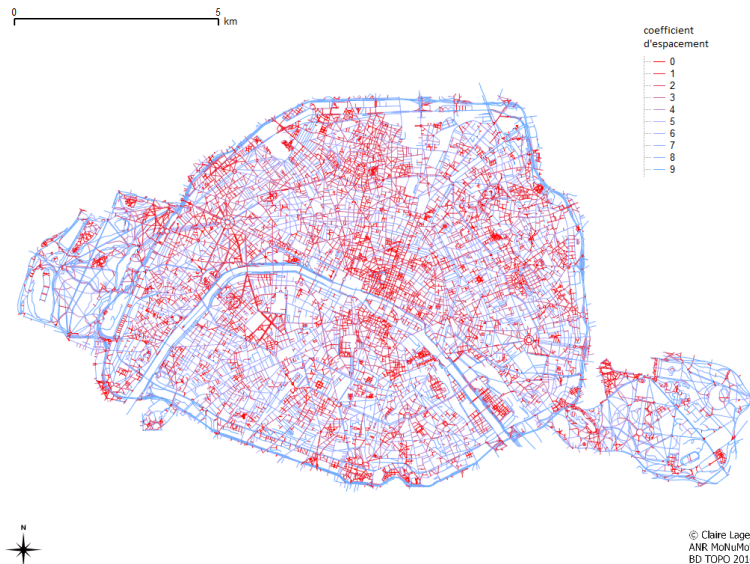
À la *connectivité* et à la *structuralité* nous associons un attribut topographique fort de la *voie* : sa longueur. En effet, dans un réseau spatial c'est une donnée non négligeable liée au caractère géographique de l'étude. La *voie* étant multi-échelle, sa longueur revêt donc un caractère identitaire. Nous construisons ainsi deux nouveaux indicateurs : l'*espacement* - qui fait ressortir les centres anciens denses - et la *maillance* - permettant une lecture multi-couche du réseau.

L'*espacement* est obtenu en divisant la longueur de chaque voie par sa connectivité. Il met en avant les structures denses (donc les centres villes ou hameaux sur des réseaux de rues). En effet, les voies courtes et très connectées vont ressortir avec un coefficient d'espacement faible.

$$espacement(v_{ref}) = \frac{length(v_{ref})}{\sum_{s \in v_{ref}} [deg(s) - 2] + 2}$$

En appliquant l'indicateur d'espacement aux voies de Paris (figure 7) nous observons les parties denses de la ville : le centre historique (autour de l'île de la Cité) mais également Belleville ou Montmartre. . . À l'inverse, nous voyons se détacher avec un fort espacement la petite ceinture, le périphérique et les bord de Seine.

FIGURE 7 – Indicateur d'*espacement* appliqué au réseau des *voies* de Paris

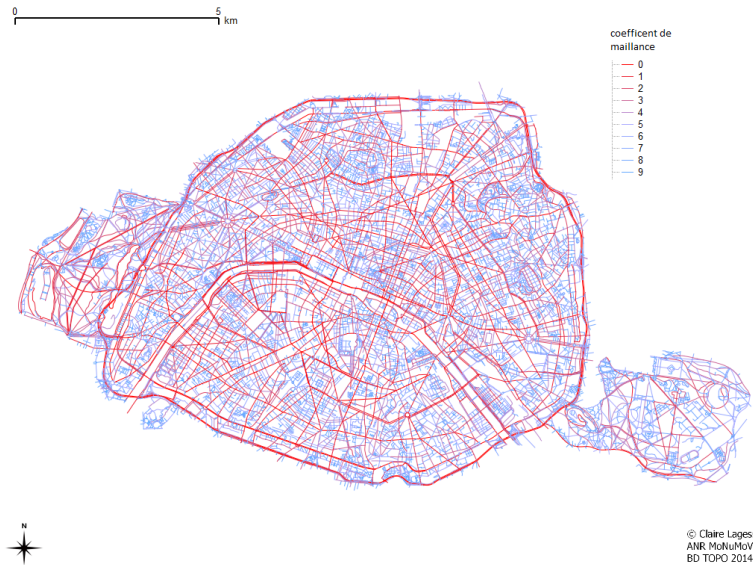


Pour visualiser la structure générale de la ville, son maillage, nous utilisons l'indicateur de *structuralité*, ayant déjà pour fonction d'établir une hiérarchie entre les voies pour faire ressortir les plus structurantes. Pour obtenir un hypergraphe couvrant tout l'espace, nous lui associons l'attribut de longueur de la voie : pour chaque voie nous divisons son coefficient de *structuralité* par sa *longueur* et nous obtenons ainsi un nouvel indicateur que nous nommons *maillance*.

$$maillance(v_{ref}) = \frac{\sum_{v \in G} [d_{simple}(v, v_{ref}) * length(v)]}{length(v_{ref})}$$

Cet indicateur permet une lecture multi-couche du réseau. Les voies à l'indicateur de structuralité fort (et donc peu structurantes) et de petite taille ont un indicateur de maillance élevé. À l'inverse, celles à l'indicateur de structuralité faible (et donc très structurantes) et de grande taille auront un indicateur de maillance faible. En faisant ressortir les voies de faible maillance, une structure cohérente de l'espace est mise en avant. Elle donne une grille de lecture en définissant une hyper structure de découpage (réseau sur le réseau) et des sous-structures de desserte locale.

FIGURE 8 – Indicateur de *maillance* appliqué au réseau des *voies* de Paris



Une fois l'indicateur de maillance appliqué sur les voies parisiennes (figure 8), nous pouvons lire l'hypergraphe de la ville. En effet, deux niveaux de lecture apparaissent : une sur-structure de déplacement rapide répartie sur

tout l'espace et une sous-structure de desserte locale qui rappelle et objective les observations de Pailhous (1970 [77]).

3. Un indicateur appliqué aux arcs : la *perpendicularité*

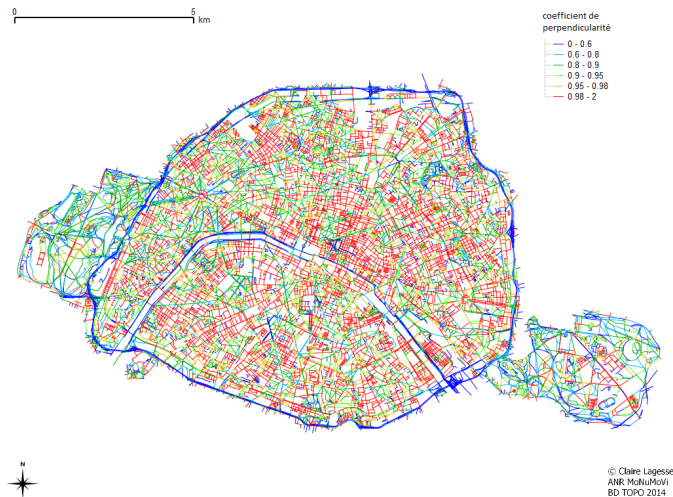
En étudiant les connections des arcs entre eux, nous définissons l'indicateur de *perpendicularité*. Celui-ci prend en compte pour chaque arc le degré de son sommet initial et celui de son sommet final ainsi que les angles qu'il forme avec les autres arcs.

Cet indicateur nous permet de faire ressortir différents types d'espaces :

- les grandes structures de connections fluides ;
- les diagonales traversantes (coupant le parcellaire) ;
- les sous structures orthogonales (quartiers souvent denses).

Sur le réseau des arcs parisiens (figure 9), l'indicateur de perpendicularité fait ressortir différentes trames de lecture. Nous pouvons observer de grandes voies obliques dont certaines ont été construites par Haussmann, des quartiers à la trame perpendiculaire (mis en valeur auparavant par le coefficient d'espacement) ainsi que de grandes structures de connexions fluides (comme le périphérique ou les bords de Seine à Paris).

FIGURE 9 – Indicateur de *perpendicularité* appliqué au réseau des *voies* de Paris



Il est intéressant de remarquer qu'en travaillant au niveau des arcs et des angles qu'ils forment entre eux à chaque sommet (caractérisation locale),

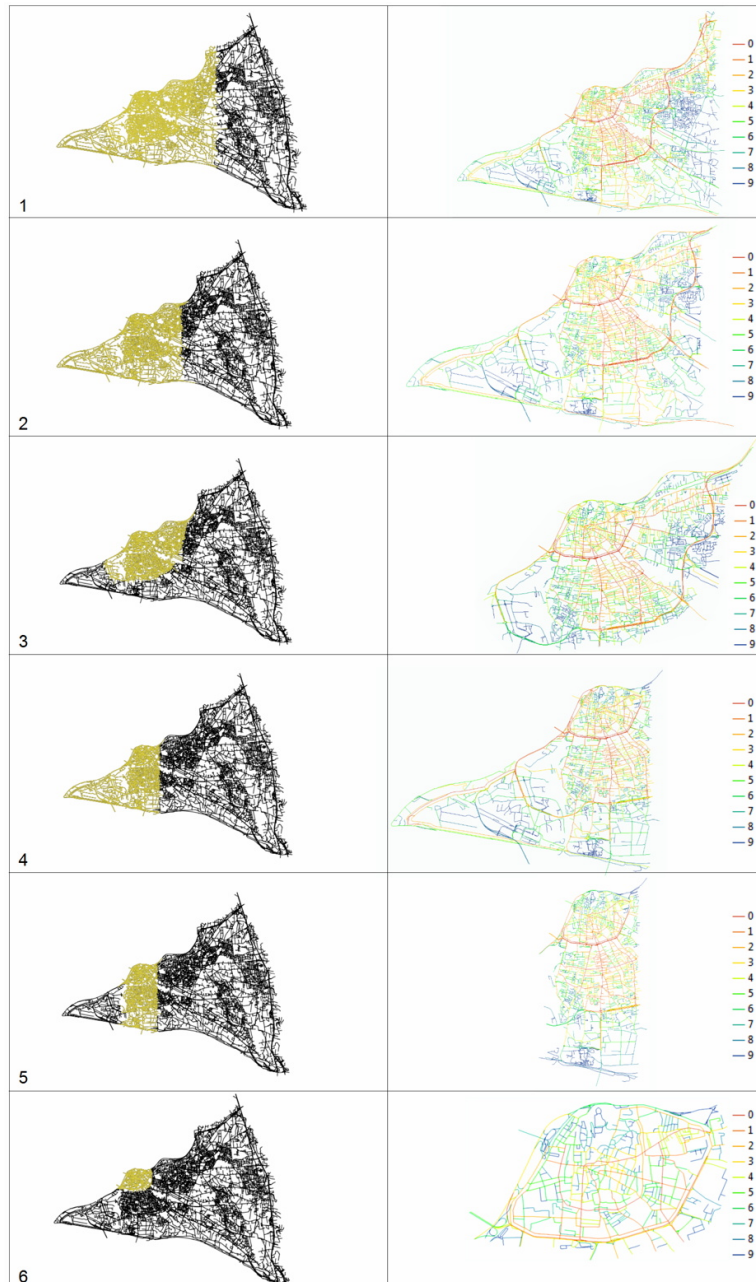
nous retrouvons de grandes structures cohérentes qui appuient les résultats obtenus avec l'objet *voie*.

4. Élargissement à d'autres réseaux viaires : étude du cas de la *structuralité*

L'application de nos indicateurs a également été faite sur d'autres réseaux viaires que celui de Paris afin d'en tester la pertinence. Nous présentons ici la lecture de la *structuralité* des réseaux d'Avignon et ses alentours et de la ville de Manaus, au Brésil. Ces territoires de natures très différentes nous permettent de montrer le caractère générique de notre objet.

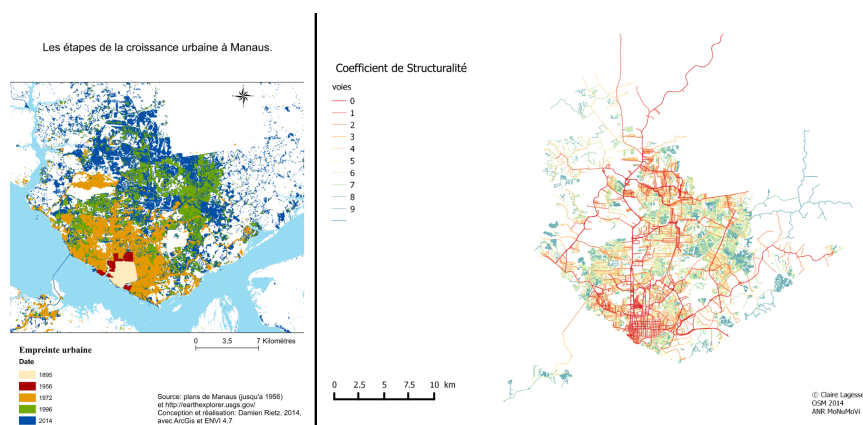
En appliquant l'indicateur de *structuralité* aux *voies* de différents découpages du réseau viaire autour d'Avignon, nous visualisons sa robustesse spatiale (indépendance au choix de l'échantillon) (figure 10). En effet, sous réserve de garder cohérentes les structures spatiales principales (telles que les roades, etc.), nous retrouvons la même structure hiérarchique du réseau. Ainsi, sur la commune d'Avignon, nous distinguons comme structurants les anciennes remparts (datant du XIV^e siècle) et le boulevard périphérique. L'avenue de la République, l'avenue Thiers et la rue Carreterie sont également mises en valeur dans le centre ville. Enfin, l'avenue Saint-Ruf et la route de Lyon sont les deux axes structurants reliant la ville respectivement vers le Sud et l'Est.

FIGURE 10 – Visualisation des variations de l'indicateur de *structuralité* en fonction des découpages du réseau viaire autour de la ville d'Avignon



L'exemple de Manaus nous permet de visualiser la capacité de notre indicateur de *structuralité* à retracer la morphogenèse d'un espace. Pour cela nous juxtaposons deux cartes (figure 11) : l'une historique d'urbanisation de l'espace, l'autre d'analyse mathématique du réseau viaire à travers la *structuralité* des *voies*. Nous montrons ainsi que l'indicateur fait apparaître les voies anciennes comme structurantes et est ainsi capable de retracer la morphogenèse du réseau.

FIGURE 11 – Comparaison entre l'histoire d'évolution de la ville de Manaus (à gauche) et l'application de l'indicateur de structuralité au réseau viaire actuel (à droite)



Conclusion

À partir de règles simples appliquées localement, il est ainsi possible d'élaborer un objet complexe multi-échelle, la *voie*, pour analyser et caractériser le réseau viaire. Cet objet se révèle être robuste dans le temps et dans l'espace. De plus, à travers les indicateurs dont il permet le développement, il rend possible une lecture globale de l'espace et une mise en évidence de sa dynamique de construction.

L'alignement, à travers la sélection de l'angle minimum entre arcs à chaque sommet, est à l'origine de la construction des voies. Il est également prégnant dans le calcul de la *structuralité*, qui associe le coût du tournant à la place de la voie dans le réseau. Cette étude démontre qu'il est possible de faire ressortir une structure du réseau et de retracer sa morphogenèse à partir de ses lignes *continûment alignées*.

En effet, tourner implique une action volontaire supplémentaire de l'acteur. Suivre un tracé linéaire ou suivre un tracé canalisé n'implique pas de réflexion particulière : l'acteur avance dans une ligne de perspective balisée. Une voie peut comporter un changement de direction abrupte s'il intervient sur un point annexe. Dans ce cas, l'acteur n'a pas d'autre choix que de tourner, mais il est guidé, il n'a pas à prendre de décision. C'est entre autre ce qui différencie ce travail de ceux qui traitent de syntaxe spatiale, où un arc peut être divisé s'il ne suit pas la même ligne de perspective.

Que l'acteur soit à pied ou en transport motorisé, la volonté impliquée reste la même. C'est d'ailleurs pour cela que notre modèle considère les ronds-points comme de vraies ruptures : le plus souvent ceux-ci cassent la voie. La première conséquence est que les avenues haussmanniennes ne sont pas mises en relief dans le plan de structuralité de Paris mais que l'on peut voir se dessiner des structures plus anciennes.

Si l'on observe les lignes de transports tracées, le projet de tramway d'Avignon appuie la pertinence de l'indicateur de *structuralité* sur le terrain : en effet, les lignes dessinées suivent les voies structurantes de notre calcul (avenue Saint-Ruf, avenue de la République, rue Carreterie, route de Lyon...). Cela montre que pour le tramway, qui utilise des voies ferrées, le coût du tournant n'est pas négligeable, et qu'il dessert des lieux assurant un transfert rapide vers le reste du réseau.

En plus de pouvoir guider les réflexions des urbanistes, ces travaux ont pour aspiration d'allier les dimensions géographiques et historiques pour créer un modèle de compréhension des dynamiques d'expansion d'un espace à différentes échelles.

La planification francilienne au prisme de l'évolution de l'accessibilité par le réseau ferré : décalage entre ambitions et réalisations

Adrien BÉZIAT⁴ et Adeline HEITZ⁵

Introduction

La planification régionale du territoire francilien passe depuis 1965 par la publication d'un Schéma Directeur, un document d'urbanisme donnant les grandes orientations pour l'aménagement de l'Île-de-France. Ces documents se sont succédés, et la dernière version date de 2014. Parmi les « trois piliers du projet spatial » identifiés par ce Schéma, le premier est l'amélioration du réseau de transport, notamment par la création du (Nouveau) Grand Paris, un réseau de métros circulaires autour de la capitale française (SDRIF, 2014). Ce projet de rocade marque une nouvelle étape dans l'histoire du réseau francilien et de son maillage (IAU, 2010 [54]). D'abord composé de lignes desservant le centre de Paris et de plusieurs rocades (métro, petite et grande ceintures), ce réseau radioconcentrique va voir la qualité de son maillage diminuer au cours du XX^e siècle, la priorité étant donnée aux lignes radiales accompagnant l'urbanisation « en doigts de gants » de la région Île-de-France. L'objectif de cette communication est d'analyser l'évolution du réseau ferré francilien, à travers l'accessibilité que ses gares garantissent aux territoires, afin de jeter un regard nouveau sur les projets d'aménagement régional portés par les documents de planification successifs. Cette mesure de l'évolution du réseau passe par le calcul d'indices d'accessibilité, utilisant la théorie des graphes, et ayant permis la création d'une large base de données lors de la réalisation d'un mémoire (Béziat *et al.*, 2012 [11]). Suite à l'explication détaillée de la méthodologie utilisée pour la création de ces indices d'accessibilité (Partie 1), nous exposerons nos résultats afin d'analyser l'histoire de la planification francilienne (ses ambitions, ses réussites et ses échecs) au prisme de l'évolution du réseau ferré (Parties 2 et 3), avant de proposer une étude prospective interrogeant la vision régionale du Schéma Directeur pour le futur, en parallèle des projets d'agrandissement du réseau portés par la réalisation hypothétique du Nouveau Grand Paris (Partie 4).

5. Université Paris Est, IFSTTAR-SPLOTT

1. Le calcul de l'accessibilité : une application de la théorie des graphes

1.1 La mesure de l'accessibilité

La mobilité est générée par les différences de localisation des agents économiques dans l'espace. Les déplacements sont nécessaires au fonctionnement urbain, en mettant en relation ces agents et en leur permettant d'accéder à diverses ressources territoriales (Bavoux *et al.*, 2005 [7]). L'aménagement du territoire a donc fait la part belle à la construction de réseaux de transport afin de structurer les dynamiques territoriales même si, comme J-M. Offner (1993 [76]) le remarque, les réseaux de transport font régulièrement l'objet d'interprétations politiques et de « mystification » scientifique qui conduit bien souvent à établir un lien de causalité entre réseau et développement du territoire, plutôt qu'une relation de « congruence » qui met en avant un effet de réciprocité dans le temps.

L'accessibilité est une mesure intéressante de la qualité d'offre d'un réseau de transport, puisqu'elle permet de mesurer la plus ou moins grande facilité avec laquelle un lieu peut être atteint par un ou plusieurs autres lieux, en utilisant les moyens de transports existants (Pumain *et al.*, 2006 [90]). Ainsi, l'accessibilité ne permet pas de mesurer des flux réels, mais plutôt des « potentialités d'interaction » (Desjardins *et al.*, 2013 [26]). Bien sûr, cette facilité d'atteindre les lieux peut être analysée de différentes manières (Bavoux *et al.*, 2005 [7]). De nombreux travaux ont ainsi abordé les questions d'accessibilité monétaire (le coût du transport), corporelle (sa pénibilité), cognitive et culturelle (la connaissance et les informations nécessaires pour emprunter le réseau), et surtout l'accessibilité spatiale et temporelle, qui est l'objet de notre travail. L'accessibilité temporelle dépend bien sûr de la distance entre deux lieux, mais aussi de la qualité de service, prenant en compte les infrastructures, les véhicules et les techniques d'exploitation qui forment un réseau de transport.

La théorie des graphes permet de quantifier mathématiquement l'accessibilité d'un lieu au sein d'un réseau. Il faut pour cela modéliser le réseau ferroviaire francilien sous la forme d'un graphe G , composé d'un ensemble de sommets v et de liens e , tel que $G = (v, e)$. Les sommets sont les différentes gares du réseau. Les liens sont caractérisés par un temps de parcours. Cela inclut d'une part les temps de trajets effectués en transport ferré entre les stations du réseau, mais aussi les temps de correspondance à l'intérieur d'une station.

1.2 Les temps de parcours entre les stations du réseau : sources des données

La première étape de la fabrication du graphe concerne l'encodage des différentes stations des lignes du réseau. Les modes de transport recensés sont les métros, les tramways, les RER et les Transiliens (ou trains de banlieue) existants pour les années 1975, 1990, 2014 et 2035. Les lignes (de même que la date) choisies pour 2035 sont tout à fait hypothétiques étant donnés les problèmes de financement et de gouvernance du Grand Paris Express, mais le but est de prendre les projets tels qu'ils existent aujourd'hui. Le recensement des temps de parcours a nécessité la construction d'une grande base de données. La collecte est très simple pour 2014 : les données sont accessibles sur les sites de la RATP et de la SNCF. Pour l'année 1975, les anciennes fiches horaires CHAIX ont été utilisées. L'année 1990 a nécessité le recueil de fiches horaires d'archives de la SNCF dans les locaux de l'Association d'Histoire des Chemins de Fer (AHICF).

La difficulté principale a concerné l'estimation des temps de parcours pour l'année 2035, pour des lignes qui n'existent pas encore. Ces données sont l'objet d'approximation, en mesurant *via* un logiciel SIG la distance d des tronçons prévus. Une vitesse moyenne S a été retenue en prenant en compte les estimations de la Société du Grand Paris pour ces futurs trains. Pour plus de réalisme, il a paru judicieux de prendre en compte les accélérations et décélérations des métros, en mesurant une vitesse moyenne S_{ad} plus basse pour les 500 mètres à l'arrivée et au départ de chaque station.

$$T = \left(\frac{1}{S_{ad}} \times 60 \right) + \left(\frac{d-1}{S} \times 60 \right)$$

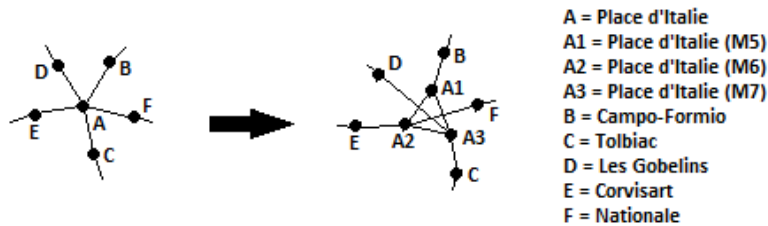
Cette méthode donne des résultats assez satisfaisants. La Société du Grand Paris ne propose pas d'estimation de temps de parcours entre chaque station. Par contre, elle donne des estimations pour des lignes entières, et les valeurs sont assez proches de la somme des valeurs de temps estimées pour les liens entre les paires de sommets des nouvelles stations du Grand Paris.

1.3 L'estimation des temps de correspondance à l'intérieur des stations

Le simple relevé des temps de parcours entre les stations ne suffit pas à représenter de manière précise la durée totale d'un trajet. Il faut prendre en compte la correspondance à l'intérieur de la station. Cette correspondance se compose d'un temps de trajet piétonnier (un temps de trajet moyen de

trois minutes a été retenu); il se compose aussi d'un temps d'attente du train sur le quai, qui est estimé à la moitié de l'intervalle moyen entre deux trains. Ce calcul de l'intervalle moyen a nécessité une mesure de la desserte en trains des stations (c'est-à-dire le nombre de trains par heure), utilisant les mêmes bases de données que les temps de parcours. La prise en compte des temps de correspondance complexifie beaucoup la construction du graphe, avec certaines gares qui sont divisées en plusieurs « sous-gares ». Le premier exemple concerne un cas classique de station desservie par plusieurs lignes. Pour la station de métro Place d'Italie à Paris, cela donne la figure 12.

FIGURE 12 – La division d'une station dans le cas d'une desserte de plusieurs lignes (Place d'Italie)



Un autre cas à prendre en compte concerne les lignes qui se divisent en deux branches (voir par exemple la gare d'Esblly en Seine-et-Marne, figure 13). Enfin, le dernier cas à considérer concerne les trains directs les plus importants, par exemple, les trains directs qui desservent Choisy-le-Roi dans le Val-de-Marne (figure 14).

FIGURE 13 – La division d'une station dans le cas d'un embranchement de la ligne (Esblly)

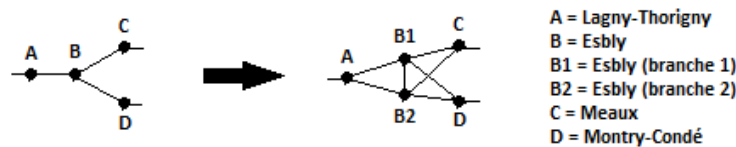
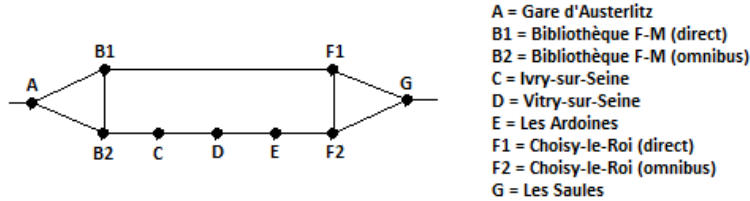


FIGURE 14 – La prise en compte des principaux trains directs (Choisy-le-Roi)



Il est difficile de prendre en compte les services dans leur intégralité, mais il nous paraissait au moins utile de prendre les principaux directs qui modifient les temps de parcours de manière importante.

1.4 La constitution du graphe

La dernière étape consiste à créer, à partir de cette base de données, une matrice origine destination qui comprend les temps de parcours de toutes les stations vers toutes les autres stations. Cette matrice permet de calculer notre indice d'accessibilité. Notre mesure est dérivée de l'indice de Shimbel (1953 [99]), utilisé dans de nombreux travaux sur l'accessibilité (Rodrigue *et al.*, 2009 [91] ; Bretagnolle *et al.*, 2010 [15]) : il s'agit de l'accessibilité géographique (Ducruet, 2010 [30]) d'un sommet du graphe $v(G)$ qui est exprimée par le rapport entre la somme des temps de parcours d'un sommet vers tous les autres sommets du réseau t_{ij} et le nombre de sommets du réseau v .

$$v(G) = \frac{\sum_i^n (\sum_i^v t_{ij})}{v}$$

La difficulté consiste principalement à agréger les résultats des « sous-stations », pour donner un seul indice d'accessibilité par station. Chaque sous-station a un temps de parcours vers toutes les autres stations du graphe. Nous avons sélectionné à chaque fois le temps de parcours le plus court, pour rassembler les résultats des sous-stations au sein d'un seul sommet.

2. L'amélioration de l'accessibilité au réseau ferré en Île-de-France entre 1960 et 1990 sur fond de déconcentration et décongestion du centre parisien

En 1947, l'ouvrage de J-F Gravier, *Paris et le désert français*, aborde la place de Paris dans la géographie française. Il exhorte les politiques publiques

à repenser la planification des réseaux en lien avec le développement de l'urbanisation, aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle de la région Île-de-France.

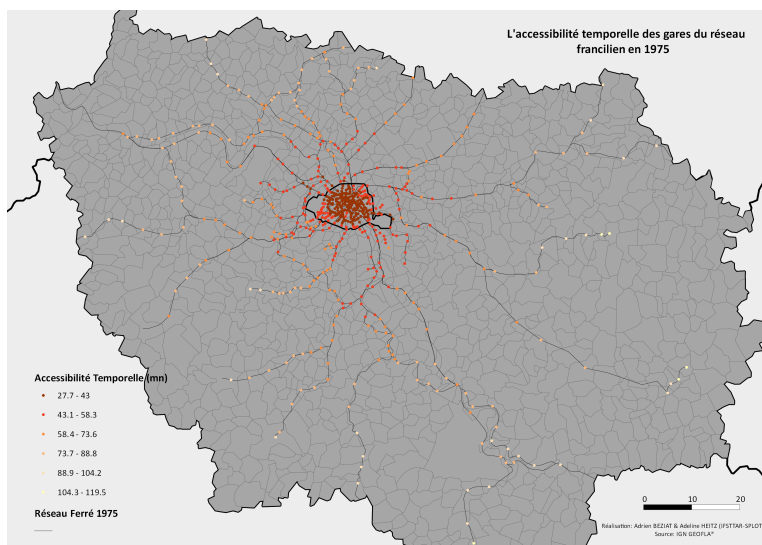
2.1 L'agglomération parisienne, entre réseau hérité et politique de transport volontariste

Les années 1950 et 1960 sont marquées par d'importantes politiques de reconstruction et de développement qui se traduisent par une volonté de maîtriser l'urbanisation qui a tendance à se développer rapidement depuis Paris vers la banlieue sous le double effet de la saturation de la population et des activités dans Paris et du développement massif de l'automobile. Le gouvernement alors en charge des questions de planification et de l'aménagement du territoire francilien va tenter de maîtriser cette « urbanisation galopante » et de décongestionner Paris. Pour cela, il va créer cinq villes nouvelles (Sénart, Évry, Saint-Quentin-en-Yvelines, Cergy-Pontoise, Marne-la-Vallée) autour de Paris qui devront accueillir des activités et des populations afin de mieux les répartir, et un nouveau réseau de transport ferré le long duquel il espère fixer la population.

En 1975, le réseau ferré est inégalement développé, notamment entre l'Ouest et l'Est de la région et s'est développé en étoile depuis Paris vers la banlieue (figure 15). Il est peu maillé en dehors de Paris, ce qui fait de Châtelet et des grandes gares parisiennes le principal lieu de correspondances, y compris pour les trajets qui vont de banlieue à banlieue, ce qui va à l'encontre d'une volonté de décongestionnement du cœur parisien. Le système de transport ferré est radioconcentrique et l'accessibilité décroît selon un gradient centre-périphérie depuis Paris vers la banlieue.

Les acteurs de l'aménagement du territoire se multiplient avec les politiques de décentralisation du début des années 1980, l'État passant le relais à la Région (Le Galès, 2011 [62]). La réforme s'achève en 1995 quand la Région Île-de-France récupère les pleines compétences en matière de planification du transport. Durant cette période, l'État conserve la mainmise sur la planification des transports, mais inscrit le développement de l'agglomération parisienne dans une vision plus régionale (IAU, 2005 [53]). Les différentes politiques menées sur cette période sont marquées par la volonté de lutter contre les inégalités territoriales, qu'il s'agisse des inégalités Est/Ouest ou centre/périphérie (Desjardins *et al.*, 2013 [26]). La recherche d'un équilibre territorial régional s'enracine, et on retrouve les objectifs des premiers documents de planification qui cherchaient à répartir les activités et la population sur le territoire.

FIGURE 15 – L’accessibilité en 1975 : un gradient centre-périphérie depuis Paris



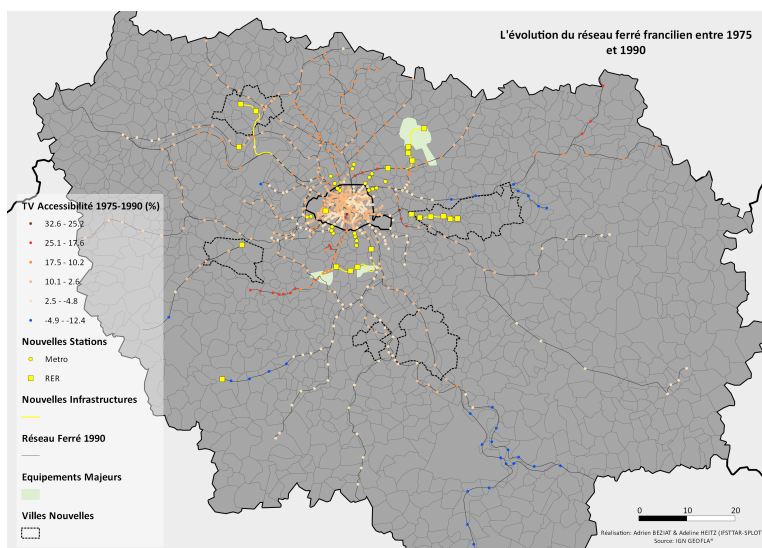
L’intervention de l’État dans la planification du transport permet également au gouvernement d’adosser le développement de l’agglomération parisienne aux stratégies de développement national, dans une volonté de faire de Paris une ville au rayonnement international (Larroque *et al.*, 2002 [60]) : c’est une politique de grands équipements en banlieue (aéroports, gares TGV, marché international de Rungis), tout en misant sur les atouts touristiques et culturels de Paris (renforcés par la construction d’Eurodisney).

2.2 Les réussites de la politique des réseaux entre 1975 et 1990

Les principales réalisations (ou en tout cas les plus coûteuses) concernant le réseau ferré entre 1975 et 1990 visent un objectif pragmatique : la décongestion des lignes du centre de Paris par la desserte du cœur du réseau francilien, Châtelet. Les lignes A et B du Métro Express Régional s’y rejoignent, formant ainsi les prémisses du Réseau Express Régional. La ligne D du RER dessert également Châtelet en 1987. La ligne C est créée en 1980, desservant la rive Sud et certains sites touristiques majeurs de Paris et sa banlieue (la Tour Eiffel, les Invalides, Saint-Michel et Notre-Dame, Versailles. . .).

Cela dit, la période 1975-1990 est aussi une époque d'extension *extra-muros* du réseau (figure 16). Les villes nouvelles, objectif majeur de la planification étatique, sont concernées en premier chef. Cergy et Marne-la-Vallée sont desservies par le nouveau RER A, Pontoise et Saint-Quentin-en-Yvelines par le RER C. Si Melun ne bénéficie par d'extension du réseau, un nouveau service de trains directs, plus fréquents et plus rapides, est proposé. Par ailleurs, d'autres villes en dehors de Paris voient leur accessibilité augmentée par des nouveaux directs et des trains plus rapides (Meaux, Mantes-la-Jolie, Aulnay-sous-Bois et plus généralement tout le réseau Nord dans le Val d'Oise), ou par des modifications du réseau (la ligne Sud du RER B, en particulier grâce à la connexion Saint-Michel/Châtelet). Certains espaces peu denses (de Seine-et-Marne, des Yvelines et d'Essonne) sont au contraire touchés par des ralentissements de services causant de légères pertes d'accessibilité.

FIGURE 16 – L'extension du réseau pour desservir des pôles *extra-muros*



La réalisation du RER A, et de la connexion avec le réseau Est à Val-de-Fontenay, est aussi l'occasion de densifier le réseau à l'Est de Paris pour gommer les inégalités Est/Ouest, objectif ancien de la planification francilienne. Les grands équipements d'intérêts nationaux sont desservis : le débranchement du RER B au Nord permet d'atteindre l'aéroport Charles-de-Gaulle, et la nouvelle tangentielle du RER C entre Choisy-le-Roi et Massy-Palaiseau

permet d'améliorer l'accessibilité de l'aéroport d'Orly, de la zone logistique de Rungis et de la nouvelle gare TGV de Massy-Palaiseau. Le RER A progresse vers l'Est pour atteindre un autre site touristique majeur programmé par l'État, Eurodisney (le parc Disneyland ouvrira ses portes en 1992, en même temps que la station RER). L'extension du réseau ferré accompagne donc plutôt bien les objectifs des principaux documents de planification de l'État, visant une nouvelle polycentralité en Île-de-France, grâce à l'aménagement de pôles urbains et de grands équipements en dehors de Paris. Il convient aussi d'évoquer les projets de prolongements vers la proche couronne de lignes radiales du métro qui voient le jour à la fin des années 80 et sont poursuivis dans les années 90 : la ligne 5 au Nord, la ligne 7 (Nord et Sud), la ligne 10 (Ouest), la ligne 13 (Nord et Sud).

3. L'amélioration de l'accessibilité au réseau ferré en Île-de-France entre 1990 et 2012 : faire émerger une métropole polycentrique

3.1 Le rêve de la métropole polycentrique : en finir avec une Île-de-France organisée de manière radioconcentrique

La fin des années 1980 est marquée par une intégration des questions sociales dans les politiques d'aménagement et d'urbanisme. La région a désormais les compétences en matière de transport et de nouveaux objectifs sociaux : au-delà de l'équilibre territorial, c'est aussi l'équilibre social qui est recherché. La mise en place du Schéma de Développement de la Région Île-de-France (SDRIF) en 1994 marque un tournant dans la planification du territoire de la région parisienne et accompagne une importante vague de politique de réhabilitation et de rénovation des espaces situés en banlieue, avec notamment la prise en compte de la loi n° 91-662 du 13 juillet 1991 d'orientation pour la ville qui vise à rétablir la « cohésion sociale », à lutter contre les « phénomènes de ségrégation » et à permettre la « coexistence de diverses catégories sociales ». Cette périphérie de la ville-centre s'est développée en continuité morphologique mais en discontinuité administrative et sociale. Ces marges ont également été le lieu de la construction des grands ensembles devenus des lieux « de cristallisation des problèmes de politiques de la ville » (Allain, 2010 [1]). Des villes de la petite couronne, telles que Saint-Denis, Le Bourget, Gennevilliers sont au cœur de ces politiques sociales. Ancienne ceinture industrielle de Paris, ces espaces historiquement populaires tendent à se gentrifier, amorçant une transition urbaine (Noin, 1994 [74] ; Preteceille, 2003 [85] ; Clerval, 2010 [19]). Le Schéma Directeur

consacre le retour du tramway dans Paris qui avait disparu après la guerre du fait de son manque de compétitivité par rapport au bus ou au métro. Ces tramways sont les premiers projets de rocade à voir le jour (IAU, 2010 [54]) depuis les premiers schémas de planification où ces rocades étaient considérées comme des projets importants mais « potentiels » (1965 [72]).

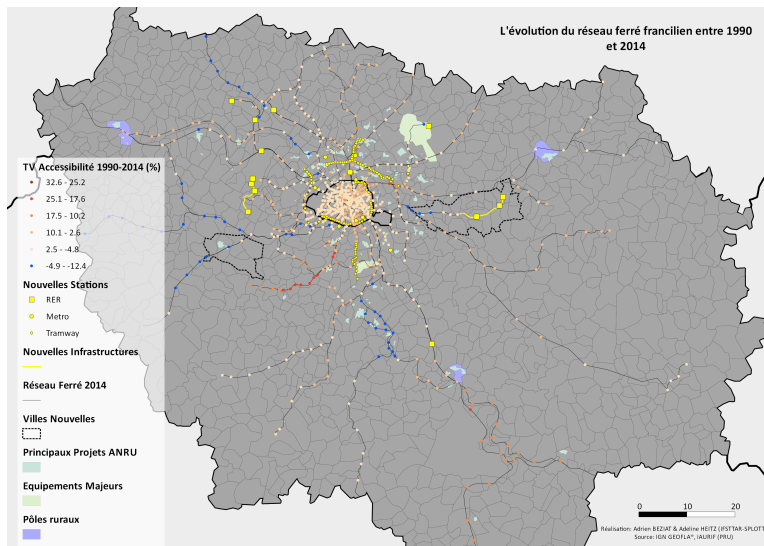
Avec le Schéma Directeur de 1994, on passe clairement d'une logique de déconcentration à une logique de construction métropolitaine polycentrique. Les transports, notamment ferrés, sont au cœur des enjeux métropolitains : ils sont un des éléments de l'efficacité métropolitaine (Prud'homme et Lee, 1999 [88]). On veut développer des territoires d'appui pour répartir l'activité et la population sur le territoire notamment dans des villes qui permettront d'assoir Paris comme une grande aire métropolitaine capable de s'intégrer dans un réseau de villes de rang international. Pour cela, le Schéma Directeur fait de Roissy, Marne-la-Vallée et Orsay-Saclay-Massy-Orly des pôles accessibles à l'échelle européenne avec les aéroports et le TGV. Les villes nouvelles sont considérées comme adultes et doivent poursuivre leur politique de développement : « Cergy-Pontoise se confirme comme le principal pôle urbain du Val d'Oise, Marne-La-Vallée constitue un atout important dans le rééquilibrage vers l'Est de la région Île-de-France, avec ses implantations tertiaires, scientifiques (Cité Descartes) et touristiques. Sénart, mieux desservie par l'autoroute, le RER et le TGV, amorce une phase de développement. Les dynamiques économiques nées à Évry rayonnent sur le nord et le centre de l'Essonne. Saint-Quentin en Yvelines a su se constituer comme un pôle urbain » (SDRIF, 1994 [29]). Ces pôles doivent assurer dans la grande couronne un effet d'entraînement pour le développement urbain. Mais le Schéma Directeur va également chercher à développer des pôles régionaux comme Meaux, Melun, Mantes qu'il qualifie de « pôles ruraux ». Les politiques publiques cherchent ainsi à assurer le développement en grande banlieue et à limiter les inégalités entre agglomération dense et espaces périurbains, thème émergent dans la recherche dès la fin des années 1980 (Berger, 1986 [10]; Beaucire, 1988 [8]). Après 30 ans de planification francilienne, le diagnostic territorial montre l'existence d'inégalités d'accès entre les zones rurales et les zones urbaines, la Région cherche donc à garantir l'accès aux zones moins denses.

Les effets de la politique polycentrique se sont révélés assez marginaux. Ces villes n'ont pas réussi à se détacher de l'influence de Paris, étant devenues « repoussantes » par leur faible densité et leur manque d'activité (Dumont, 2010 [31]). En 2012, on constate que la région Île-de-France est encore très soumise à cette logique radioconcentrique que le réseau ferré enracine dans le territoire.

3.2 Entre 1990 et 2014 : des changements importants du réseau, des gains d'accessibilité faibles

Malgré ce renouveau des objectifs de l'action publique, des investissements très importants sont une nouvelle fois consentis pour le centre de l'agglomération parisienne (figure 17). L'axe Châtelet/Gare de Lyon, toujours extrêmement congestionné aux heures de pointe, déjà doublé par la ligne 1 et le RER A, est triplé par le RER D en 1995, puis quadruplé en 1998 par l'ouverture de la ligne 14. Un an plus tard, une nouvelle connexion entre la Gare Saint-Lazare et la Gare du Nord est permise par la création de la ligne E du RER. Cela dit, de nombreuses extensions du réseau concernent plutôt la périphérie de Paris, soit par des lignes radiales (extension des lignes de métro et lignes de tramway 5 et 7), soit par des rocades (lignes de tramway 1, 2, 3 et 4). En accord avec les politiques sociales de rééquilibrage entre les départements de la première couronne, une attention particulière est portée à la Seine-Saint-Denis, concernée par la construction des RER D et E, par les prolongements des lignes de métro 12 et 13, et par les tramways 1, 4 et 5.

FIGURE 17 – D'une politique de développement polycentrique à la rénovation urbaine



Les investissements pour la grande couronne sont moins importants. Les principaux changements passent par des constructions de gares supplémentaires, à Cergy, Roissy, Achères ou Savigny. L'évolution majeure se trouve dans la mise en service des Transiliens, qui remplacent les anciens trains de banlieue et vont réorganiser les services ferroviaires, avec de nouveaux trains directs et des nouveaux temps de parcours. Une portion de l'ancienne grande ceinture est rouverte à l'Ouest pour créer un débranchement du Transilien L. Une nouvelle ligne de rocade reliant La Défense à Versailles, le Transilien U, est créée à partir d'infrastructures existantes. On voit qu'en parallèle de la politique sociale de désenclavement des quartiers défavorisés, des investissements sont également réalisés pour la banlieue aisée de l'Ouest parisien.

Les effets de ces politiques de réseau sur l'accessibilité sont relativement marginaux. Le premier enseignement est que la construction des tramways a un effet positif, mais assez faible : les trajets en rocade qui permettent des connexions entre les radiales sont compensés par la vitesse trop faible de ce mode de transport en commun. Finalement, les gains les plus importants sont dus plus à des changements dans les services qu'à des constructions de nouvelles lignes : les nouveaux directs vers Massy-Palaiseau (RER B), Noisy-le-Sec (RER E), Melun (Transilien R), et Sarcelles (Transilien H) ont les effets les plus bénéfiques. Le rôle positif de la nouvelle rocade du Transilien U doit tout de même être souligné dans l'Ouest parisien. De la même manière, les effets du RER E sur le Nord-Est parisien, et de la ligne 14 sur la liaison entre Madeleine et le nouveau quartier Paris Rive Gauche de Bibliothèque François Mitterrand, sont aussi importants. Au contraire, la réorganisation des lignes de trains banlieue par les Transiliens implique un certain nombre de ralentissements en grande couronne, dans les Yvelines, l'Essonne et le Val-d'Oise notamment.

4. Les nouveaux enjeux de l'amélioration de l'accessibilité au réseau ferré en Île-de-France (2014-2035)

4.1 De la priorité donnée au développement régional à celle du développement métropolitain

Les débats sur le « Grand Paris » font remonter à la surface des problématiques anciennes. On fait le bilan de 50 ans de planification dans la Région Île-de-France et on met en avant la nécessité de conforter la place de la métropole parisienne dans le monde et dans sa région. Ce qui passe par un développement de Paris comme *gateway*, une interface internationale, nationale et régionale. Cette ambition réclame que l'agglomération parisienne

puisse se constituer comme une force régionale, de manière institutionnelle et fonctionnelle. Avec la loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles, l'État entérine sa vision pour le développement de Paris et de sa proche couronne au sein de la métropole du Grand Paris. Parallèlement, le Schéma Directeur de 2008, révisé en 2013 pour absorber la loi n° 2010-597 du 3 juin 2010 relative au Grand Paris identifiera quatre objectifs fondamentaux en matière de transport (SDRIF, 2013 [25]) : moderniser et optimiser les réseaux existants pour répondre aux besoins immédiats des franciliens ; répondre aux besoins de déplacements de banlieue à banlieue ; organiser l'offre de transports collectifs dans la grande couronne afin de répondre aux besoins de desserte des bassins de vie et de liaisons de pôle à pôle ; promouvoir les nouveaux systèmes de mobilité. L'objectif est de compléter le réseau existant par les rocades essentielles à l'amélioration de son maillage et donc de sa connectivité. Après des débats entre le projet de la région et le projet du gouvernement, les politiques publiques se mettent d'accord sur le tracé d'une double boucle autour de Paris.

Ce projet pharaonique fait transparaître de nombreux objectifs de l'action publique. Le premier est de favoriser les trajets de banlieue à banlieue par le biais des transports en commun et notamment des transports ferrés. On a là un renversement de paradigme fondamental depuis le premier plan d'aménagement des années 1960 (PADOG) : le développement du réseau ferré n'est plus pensé en complémentarité du réseau routier mais bien comme un moyen de substitution. Au nom du développement durable, mais aussi pour des questions d'équité sociale, de lutte contre la pollution par le CO₂, et dans une optique de fluidification du réseau viaire (lutte contre la congestion), le Schéma Directeur de 2008 et sa révision en 2013 font du réseau ferré le moyen privilégié pour les déplacements des franciliens.

Par ces améliorations, on cherche à densifier les espaces urbanisés, à « reconstruire la ville sur elle-même » en développant les pôles déjà existants. Une fois encore la planification du transport est un outil qui doit permettre de stabiliser et de fixer le développement de la population. Les politiques publiques entendent lutter contre l'étalement urbain et favoriser la préservation des espaces naturels et agricoles dans la région parisienne. Afin de développer une métropole durable, le Schéma Directeur continue les politiques précédemment menées sur la recherche d'un équilibre territorial à travers des pôles locaux. On conserve l'idée de faire de Paris une métropole multipolaire. Les pôles identifiés les décennies précédentes restent d'actualité. Cependant, ces pôles sont définis selon leur fonction, un ensemble d'activités qui sert la métropole et en fait des pôles de compétitivité. Ainsi Roissy devient la porte

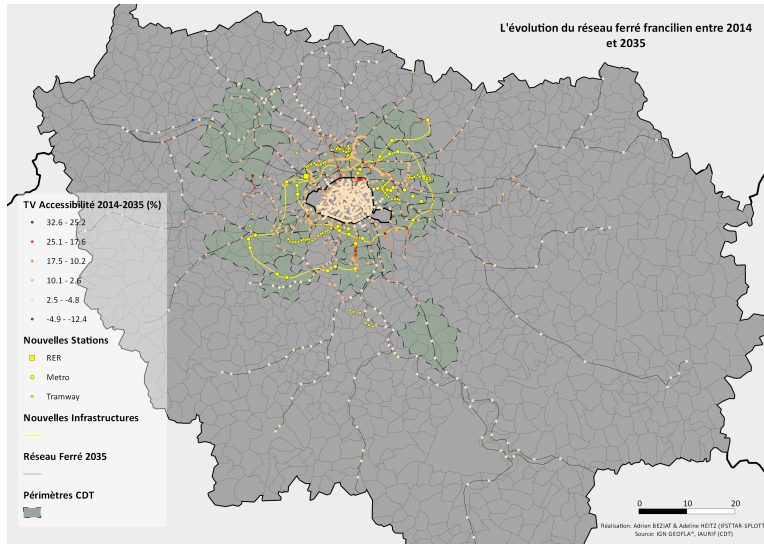
d'entrée principale sur le monde, le Bourget devient une « porte du ciel », Saint Denis un « carrefour de la création », La Défense, à l'instar de Londres, est identifiée comme « la *city* » française, Confluence Seine Oise incarne le projet d'ouverture de Paris sur la mer (relier Paris au Havre par un corridor de transport fluviomaritime), le plateau de Saclay est identifié comme une « *scientific valley* », la vallée de la Bièvre comme un pôle dédié aux biotechnologies, le secteur de Noisy-Descartes comme un pôle de recherche universitaire, et Clichy-Montfermeil incarne l'idée de « la nature en ville » . . .

4.2 Vers le développement de la proche couronne et la création du Grand Paris ?

Les projets d'extension du réseau à l'horizon 2035 sont nombreux, et plus ou moins réalistes. Nous avons choisi pour cette étude (figure 18) les projets qui sont les plus avancés dans leurs réalisations, à l'exception du Grand Paris, qui nous semblait devoir être pris comme un tout (alors qu'à l'heure actuelle, seule une petite partie du projet a dépassé le stade de l'enquête publique). Ce projet est en effet au centre du futur développement francilien. Il est composé d'une première boucle autour de Paris (lignes 15 et 16), de deux transversales desservant la Seine-Saint-Denis (le prolongement de la ligne 11 vers Noisy-Champs et la ligne 17 vers l'aéroport Charles-de-Gaulle), d'une ligne traversant Paris reliant Saint-Denis à Orly (avec le prolongement de la ligne 14 au Nord et au Sud) et d'une deuxième boucle qui doit desservir les Yvelines et le plateau de Saclay (ligne 18). D'autres projets sont bien avancés et ont été retenus pour notre étude prospective : le prolongement du RER E à l'Ouest jusqu'à Mantes-la-Jolie, des prolongements de ligne de métro (lignes 4 au Sud et 12 au Nord) et de tramways (T1 et T4). De nouvelles lignes de tramways sont également prévues : le T6 au Sud et le T8 au Nord de Paris. Enfin, trois tram-trains viennent créer un deuxième système de rocade : les tangentiels Nord, Sud et Ouest, reprenant le trajet de l'ancienne grande ceinture. Certaines lignes sont des radiales qui partent de Paris pour desservir les communes périphériques, mais les projets de banlieue à banlieue sont beaucoup plus nombreux.

La première observation à faire est qu'il n'y a aucune perte d'accessibilité. Toutes les gares gagnent à un maillage accru du réseau. Certaines gagnent évidemment plus que d'autres : certaines stations dans Paris sont ainsi favorisées par le prolongement du RER E (seul projet vraiment parisien), qui permet de relier la Porte Maillot et la Gare du Nord rapidement. L'accessibilité est assez stable en grande couronne, avec des gains assez modestes. Les principaux gains d'accessibilité concernent logiquement la petite couronne,

FIGURE 18 – Les projets du Grand Paris : vers un rattrapage de la petite couronne ?



avec des accroissements généralisés grâce aux multiples rocades et tangentes. On observe même, pour certains pôles de proche banlieue, un rattrapage des grandes gares parisiennes : Saint-Denis au Nord, Noisy-Champs à l'Est, Villejuif au Sud et La Défense à l'Ouest. Ces nouveaux moyens de transport « banlieue-banlieue » pourraient permettre de constituer pour la première fois des nouvelles centralités, avec des niveaux d'accessibilité comparables à ceux de Paris, créant ainsi le Grand Paris demandé par l'action publique depuis les années 60.

Conclusion : La difficile conciliation de l'action sur le réseau et sur les territoires

L'analyse spatiale, et plus spécifiquement la théorie des graphes, est un outil particulièrement puissant pour analyser les réseaux et leur évolution. Notre application de la théorie des graphes présente l'intérêt, selon nous, d'analyser les temps de parcours des réseaux de transports dans leur intégralité, en prenant en compte les temps de correspondance au sein des stations ainsi que les différents types de services (directs ou omnibus). Cette méthode permet de souligner la multiplicité des possibilités en terme de po-

litique de transport : les gains d'accessibilité peuvent aussi bien venir en construisant des nouvelles lignes qu'en réorganisant les infrastructures déjà existantes (instauration de trains directs, plus grande fréquence de desserte, amélioration du matériel permettant une accélération des déplacements...). Mailler le réseau avec un mode de transport trop lent (comme certains tramways) peut être moins efficace (et beaucoup plus cher) que la mise en place d'un « express » vers une gare en particulier.

Cette étude de l'évolution des temps de parcours et de l'accessibilité des gares du réseau amène ensuite à plusieurs conclusions. Tout d'abord, l'action publique dans le domaine des réseaux a été, depuis 1975, relativement cohérente avec ses objectifs territoriaux : la répartition des gains d'accessibilité sur la période 1975-1990 correspond plutôt bien aux objectifs de l'État (développement des villes nouvelles, desserte des équipements structurants, rééquilibrage Est-Ouest). Si les gains d'accessibilité sont plus faibles entre 1990 et 2014, ils permettent de répondre dans une certaine mesure aux besoins de désenclavement de certains quartiers « difficiles » et de la proche banlieue. Et finalement, le maillage du réseau par des infrastructures en rocade pourrait permettre des gains d'accessibilité en proche couronne suffisant pour construire le Grand Paris.

Cela dit, si les politiques de réseaux correspondent bien aux objectifs territoriaux de l'action publique, il n'en est pas forcément de même pour le développement territorial lui-même. Plusieurs éléments peuvent être signalés à titre d'exemples : le « semi-échec » du développement des villes nouvelles (Dumont, 2010 [31]), les inégalités sociales toujours importantes entre les départements de proche couronne (ou entre l'Ouest et l'Est parisien d'ailleurs), celles entre Paris et sa banlieue, l'importance encore considérable des déplacements automobiles franciliens, notamment en petite couronne (malgré un léger recul récent)... La dichotomie entre la relative réussite des politiques de réseaux et l'absence des dynamiques territoriales attendues nous pousse, comme beaucoup d'autres, à nous interroger sur le rôle structurant des réseaux sur le territoire. Nous avons déjà montré (Desjardins *et al.*, 2012 [27]) que si le réseau ferré a évolué entre 1975 et aujourd'hui, la part des emplois franciliens auxquels il donne accès en moins de 45 minutes a en réalité diminué ! Les infrastructures changent, mais les ressources territoriales bougent à une vitesse bien plus importante. La question n'est pas en réalité celle de l'accessibilité et de la structure du réseau, mais ce à quoi donne accès le réseau. Cette observation nous pousse à conclure sur le besoin, pour que l'action publique puisse répondre à ses objectifs, d'une politique territoriale cohérente intégrant autant l'évolution du réseau que l'évolution du territoire.

Des flux origine-destination aux déplacements : des différences de quantités de polluants émises selon le réseau routier

Julie PRUD'HOMME⁶

Introduction

La qualité de vie dans un territoire est en partie liée à la qualité de l'air respiré. La détérioration de la qualité de l'air provient de l'émission de polluants, particulièrement par les véhicules utilisés pour effectuer les déplacements de personnes et de biens. Le type du véhicule utilisé conditionne les externalités négatives d'un déplacement sur l'environnement mais ce n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. À l'échelle d'un territoire, une multitude de déplacements sont effectués dans un intervalle de temps donné sur un réseau routier fixe dans sa structure mais pas dans son fonctionnement.

La représentation graphique d'un réseau se fait par l'articulation de nœuds et d'arcs. À partir de cette considération, un ensemble de déplacements, de la même manière qu'un ensemble de flux origine-destination, peut être appréhendé comme un réseau. Alors qu'un flux reste virtuel et n'est renseigné que par son point de départ et son point d'arrivée, un déplacement, lui, a deux dimensions : spatiale et temporelle. Le plus couramment, à l'échelle d'un bassin de vie, ces derniers sont matérialisés dans un espace restreint : le réseau routier.

Un réseau de flux origine-destination est relatif à la localisation des activités dans un espace (résidence, travail, loisirs, commerces...). Ce réseau immatériel se matérialise par les déplacements de personnes, ou de biens, entre ces mêmes lieux. Si les flux origine-destination sont bien souvent représentés par le plus court chemin, « à vol d'oiseau », les déplacements eux sont optimisés en temps (chemin le plus rapide) sur des infrastructures qui facilitent les déplacements (routes, chemins...) mais les contraignent dans le même temps, notamment dans le tracé du chemin emprunté et la vitesse de circulation. Ces éléments sont liés à des caractéristiques, tant structurelles que fonctionnelles, des réseaux routiers.

Les dimensions d'un réseau de flux origine-destination peuvent varier selon l'organisation spatiale des territoires. Une redéfinition des espaces d'un

6. LABEX Futurs Urbains - PRES Université Paris-Est - LISA - UMR CNRS 7583 (UPEC-UPD)

territoire, spécialisation des zones ou, au contraire, mélange des types d'aménités dans ces mêmes zones, peut *in fine* provoquer un remodelage des flux par massification ou distribution spatiale de ceux-ci. Le réseau routier qui assure la concrétisation des flux est une contrainte forte de la taille du réseau de déplacements résultant. Selon les caractéristiques du réseau routier, elles-mêmes corrélées à la situation géographique et topographique du territoire sur lequel il est déployé, pour réaliser un même flux (en origine-destination), le déplacement n'aura probablement pas la même longueur ni le même temps de voyage. En effet, les réseaux routiers n'ont pas tous la même capacité à minimiser les distances parcourues. Cet élément est primordial dans l'évaluation de la propension d'un réseau routier à engendrer l'émission de grande quantité de polluants (les émissions étant proportionnelles à la distance parcourue). La vitesse pratiquée ne peut non plus être omise dès lors que l'on s'intéresse aux émissions de polluants par les véhicules. En effet, elle agit en même temps sur les chemins effectués, donc la distance parcourue, et sur le facteur d'émission appliqué.

Dans cette communication, nous proposons d'analyser la disposition de certains réseaux routiers à augmenter les distances parcourues pour réaliser un même échantillon de flux origine-destination (Prud'homme, 2013 [87]). En comparant les déplacements liés à ces flux sur quatre réseaux routiers visuellement spécifiques (Dallas, Rennes, Nice et Grenoble) et en mettant en regard quelques indicateurs classiques de la théorie des graphes, nous constaterons la nécessaire combinaison de ces indices pour caractériser les écarts entre les réseaux. Dans un premier temps, l'analyse est faite sur la seule topologie du réseau (à vitesse constante sur tout le réseau) puis, dans un deuxième temps, en appliquant une hiérarchisation des routes avec les vitesses de circulation théoriques sur ces mêmes réseaux (respectant la hiérarchie de taille des routes). Nous présentons en premier lieu les outils statistiques utilisés pour décrire les réseaux routiers, élément contraignant et limitant l'expansion des réseaux de déplacements. Nous exposons ensuite les quatre réseaux routiers utilisés comme cas d'étude dans nos analyses. À la suite de ces éléments de méthodologie, nous révélons les résultats des analyses menées, d'une part, sur l'effet de la morphologie des réseaux routiers sur les distances parcourues et, d'autre part, sur celui de la hiérarchisation des réseaux par la vitesse.

1. Des réseaux et des outils statistiques pour les caractériser

Actuellement, les réseaux sont majoritairement caractérisés avec des indicateurs de centralité, de connexité et de connectivité du maillage. Ces indices, plutôt simples à calculer, sont issus de la théorie des graphes (Berge,

1963 [9] ; Busacker et Saaty, 1965 [17] ; Kansky, 1963 [57]). Ils se basent principalement sur le nombre de nœuds et/ou d'arêtes mais ne prennent pas en compte la longueur des liens (arêtes). Ces indices de forme de la théorie des graphes ne tiennent pas compte, par définition, de la disposition spatiale du réseau. Cela diminue d'autant leur pouvoir discriminant, mais surtout ne permet pas de décrire la façon dont ils occupent la surface, la qualité de leur desserte spatiale qui est pourtant un paramètre fondamental de l'offre de transport (Genre-Grandpierre, 2000 [40]).

1.1 Des méthodes d'analyse spatiale pour décrire l'emprise au sol des réseaux routiers

Dans ce travail, on résume la morphologie des réseaux routiers à leur emprise au sol pour leur analyse. Son motif est composé de tronçons de route et de nœuds à leurs intersections. Un tronçon de route peut être décrit par les nœuds se trouvant à ses extrémités. Les intersections ont un rôle topologique primordial dans la répartition des flux en offrant une alternative de chemin potentiellement plus avantageux. On s'intéresse alors à des indices liés aux distances au sein du réseau, à sa densité et à la distribution spatiale des intersections du réseau.

1.1.1 Description structurelle avec des indicateurs simples de distance Pour commencer la description d'un réseau routier, on peut utiliser des statistiques simples qui portent sur la longueur des tronçons de route. Celles-ci ont un impact certain sur la longueur des chemins les plus rapides. Un histogramme des fréquences des longueurs des tronçons peut permettre d'associer le réseau à un contexte (urbain, rural, périurbain). Une longueur moyenne importante des tronçons de route implique l'absence d'intersections, ce qui contraint les itinéraires. Cela peut impliquer des longueurs plus grandes des plus courts chemins en temps.

1.1.2 Description fonctionnelle des réseaux L'aspect fonctionnel d'un réseau est relatif aux vitesses pratiquées sur les tronçons de route. En complément de l'analyse des longueurs des tronçons, l'analyse des vitesses peut apporter des renseignements globaux sur la propension des réseaux à provoquer l'émission de polluants, en conditionnant les trajets des chemins les plus rapides. On peut classiquement analyser la distribution des vitesses d'un réseau, leur dispersion et leur variabilité. Des indicateurs plus précis existent. Nous présentons ceux que nous utilisons dans les analyses présentées ici.

Indice de détour Le réseau routier contraint un ou plusieurs chemin(s) pour relier deux points, imposé(s) par les infrastructures. Cette contrainte est d'autant plus importante lorsque l'on souhaite optimiser le temps de transport et emprunter le chemin le plus court en temps, le plus rapide. Ce chemin le plus rapide n'a pas obligatoirement une longueur proche de la distance à vol d'oiseau, ni même équivalente à celle du plus court chemin en distance. On calcule donc l'indice de détour D_d entre la longueur du plus court chemin et la distance à vol d'oiseau. Le plus court chemin peut être calculé selon la distance ou selon le temps. Comme nous travaillons à partir d'une optimisation du temps, nous choisissons de calculer l'indice de détour par rapport au chemin le plus rapide. Plus il est important, plus la longueur du chemin le plus rapide (PCC) est proche de la distance à vol d'oiseau, moins les détours sont importants.

$$D_d = \frac{D_{vol.d'oiseau}}{D_{PCC}} \times 100$$

avec D_d , indice de détour entre la distance à vol d'oiseau et la longueur du plus court chemin ; $D_{vol.d'oiseau}$: distance à vol d'oiseau (km) ; D_{PCC} : longueur du chemin le plus rapide (plus court chemin en temps) (km).

Cet indicateur nous renseigne sur la propension du réseau à provoquer une augmentation des distances parcourues lorsque les chemins sont optimisés pour être les plus courts en temps. Celui-ci est sans unité, compris entre 0 et 1. Plus la valeur de l'indice est proche de 1, plus le réseau permet des distances proches des plus courtes (distances à vol d'oiseau). À l'inverse, un indice proche de 0 indique une propension forte à imposer des détours importants.

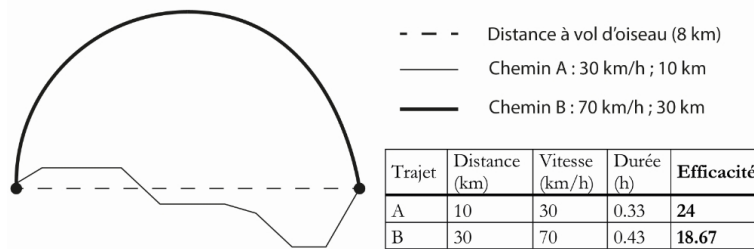
Efficacité des trajets Il est souvent possible de relier deux points par différents chemins. Certains pourront se faire avec une vitesse moyenne bien plus élevée, mais les distances à parcourir seront telles qu'on mettra plus de temps au final que si on utilise un chemin avec une vitesse moyenne plus réduite. L'efficacité $E_{f_{trajet}}$ est la distance à vol d'oiseau rapportée cette fois-ci à la durée du trajet T_{trajet} et non avec la seule vitesse pratiquée (Bretagnolle *et al.*, 2010 [15]). Plus l'indice d'efficacité est important, plus le trajet est « efficace ».

$$E_{f_{trajet}} = \frac{D_{vol.d'oiseau}}{T_{trajet}}$$

avec Ef_{trajet} : efficacité du trajet (km/h) ; $D_{vol.d'oiseau}$: distance à vol d'oiseau entre les points de départ et d'arrivée (km) et T_{trajet} : durée effective du trajet (h).

La figure 19 illustre ce concept. La distance à vol d'oiseau entre les deux points est de 8 km (le cas présenté est fictif). Selon qu'on choisit un chemin parcouru à une vitesse moyenne de 30 km/h pour 10 km (trajet A) ou qu'on emprunte celui qui permet une vitesse moyenne de 70 km/h, mais qui a une longueur de 30 km (trajet B), la durée du premier (trajet A) est plus courte. Ainsi, ce trajet, bien que plus lent, est plus efficace que le second ($Ef_A = 24$; $Ef_B = 18,67$).

FIGURE 19 – Efficacité d'un trajet



Julie Prud'homme - CNRS UMR 7300 ESPACE - 2013

Cet indicateur d'efficacité permet d'analyser la tendance des réseaux routiers, avec les vitesses qui leur sont associées, à favoriser l'augmentation des distances parcourues par les véhicules, ce qui a inévitablement une incidence forte sur les quantités de polluants émis.

Au sujet de cet indicateur, J.-F. Gleyze (2007 [43]) a formulé des réserves quant à l'utilisation de la distance à vol d'oiseau comme distance de référence. En effet, cette distance est absolument fictive, sans aucun ancrage sur le territoire. Sa comparaison avec des distances de parcours ancrées sur le réseau routier pose des questions conceptuelles pour une analyse territoriale précise. Néanmoins, dans l'analyse purement théorique que nous proposons ici, cela n'a que peu d'implications d'autant plus que le ratio entre la distance à vol d'oiseau et celle ancrée sur le réseau proposée (distance de Delaunay) est très faible (entre 1.05 et 1.09).

1.2 Des réseaux urbains typiques

Pour tenter d'identifier des caractéristiques des réseaux qui auraient tendance à influencer les distances parcourues par les véhicules qui circulent dessus (et ainsi les quantités de polluants émises), nous sélectionnons quatre réseaux visuellement caractéristiques, de formes typiques : orthogonal, radial, linéaire de vallée, linéaire de littoral.

1.2.1 Vitesses théoriques appliquées sur les réseaux Les réseaux traités se trouvant en majorité en zone urbaine ou périurbaine, la majorité des voies sont à 50 km/h. On trouve également des voies à 110, 90 et 70 km/h. N'ayant pas les moyens de connaître la calibration réelle (vitesse limite en chaque point), nous appliquons un calibrage des réseaux selon la grille qui suit (tableau 1) et la considérons comme référence « observée ». Les routes non-renseignées (NC) sont des voies de desserte locale, au sein de lotissements par exemple.

TABLEAU 1 – Importance des routes et vitesses appliquées sur les réseaux français

Importance (BD Topo)	Vitesse (km/h)
1	110
2	90
3;4	70
5	50
NC	25

Les données sur le réseau de Dallas proviennent du bureau de recensement américain (*US Census Bureau*). De la même manière, les informations sur les tronçons de route renseignent sur leur nature mais pas sur les vitesses effectivement autorisées. Pour cause, cette classification est nationale mais la législation en matière de vitesses de circulation est décidée à l'échelle des comtés. Ainsi, à Dallas, les vitesses autorisées se répartissent de 32 à 113 km/h (de 20 à 70 mph) (tableau 2).

1.2.2 Dallas, un réseau orthogonal La ville de Dallas se situe au nord-est de l'état du Texas, aux États-Unis d'Amérique, au cœur des Grandes

TABLEAU 2 – Vitesses appliquées sur le réseau de Dallas

Type de route	Vitesse (mph)	Vitesse (km/h)
<i>Primary US & State highway</i>	70	113
<i>Primary interstate</i>		
<i>secondary state and county highways</i>	60	97
<i>Access ramp</i>	50	80
<i>Local, neighborhood and city street</i>	25	40
<i>Road, parking area, roundabout</i>	20	32

Source : *US Census Bureau*

Plaines. La situation de plaine dans laquelle la ville s'inscrit permet un développement horizontal de l'aire urbaine sans réelles contraintes. Le réseau routier sélectionné est uniquement urbain. Il a la forme en damier caractéristique des réseaux nord-américains. À cette structure s'ajoute un réseau radial. On a donc deux structures différentes superposées qui se complètent. D'une part, le réseau secondaire qui assure la desserte locale et d'autre part, le réseau primaire qui permet la traversée de l'aire urbaine. Le réseau routier est ainsi très régulier. Le réseau a une longueur totale de 18 500 km. Il est composé de 180 477 tronçons d'une longueur moyenne de 103 m. La vitesse moyenne sur la totalité des tronçons de route de ce réseau est de 62 km/h.

1.2.3 Rennes, un réseau radial Dans le cadre de l'analyse de réseau typique, nous analysons le cas de Rennes. Il s'étend à 25 km autour de la ville de Rennes. Il s'approche du territoire de l'agglomération de Rennes. Il recouvre donc un espace périurbain caractérisé par la présence d'un pôle principal et de divers pôles secondaires. Le réseau routier est réparti de manière homogène sur le territoire et possède une longueur totale de 12 426 km et est composé de 114 784 tronçons. La vitesse moyenne de circulation sur ces tronçons est de 52 km/h.

1.2.4 Grenoble, un réseau linéaire de vallée La situation géographique de Grenoble est particulière, fortement contrainte par des obstacles topographiques. En effet, la ville se trouve au carrefour de trois vallées, à la périphérie du massif des Alpes. Le territoire est donc sur contraint par trois reliefs majeurs. Le réseau routier principal suit les vallées. Les routes périphériques se trouvent en territoire de montagne. Nombre d'entre elles ont ainsi un tracé très sinueux, forme caractéristique des routes de montagne. Le réseau routier

sélectionné a une longueur totale de 10 912 km. La longueur moyenne des tronçons de route est de 143 m, avec un écart type de 207 m et une vitesse moyenne de 52 km/h.

1.2.5 Nice, un réseau linéaire de littoral Le réseau routier de Nice a lui aussi une situation géographique particulière. En effet, la ville de Nice se situant sur le littoral méditerranéen avec un arrière-pays fortement vallonné, le réseau routier a une forme très particulière. On observe un réseau dense sur le littoral et un réseau à la densité très variable dans l'arrière-pays. Le réseau de Nice a une longueur totale de 10 566 km. La longueur moyenne des routes est de 146 m avec un écart type de 230 m. La vitesse moyenne sur les tronçons de route est de 51 km/h.

Le réseau de Dallas sélectionné est celui qui recouvre la plus grande surface (2 440 km²) avec une longueur totale de 18 510 km et qui est composé du plus grand nombre de tronçons (180 477), avec une longueur moyenne des tronçons de 103 mètres. Le réseau de Rennes recouvre quant à lui 1 910 km². D'une distance totale de 12 426 km, il est composé de 114 784 tronçons d'une longueur moyenne de 108 m. Les réseaux de Grenoble et Nice considérés ont des caractéristiques très proches. Respectivement, ils couvrent 1675 et 1707 km² et ont une longueur totale de 10 912 et 10 566 km. Les tronçons de route ont une longueur moyenne de 143 et 146 m, avec des écart-types semblables : 207 et 230 m.

2. Influence des caractéristiques morphologiques des réseaux sur les distances parcourues

Pour évaluer l'impact de la morphologie des réseaux sur les émissions de polluants, nous commençons par comparer les distances induites par 500 déplacements identiques en origine et destination sur quatre réseaux différents. Dans un premier temps, ces réseaux sont évalués avec une vitesse constante de 60 km/h. En évaluant ensuite les routes avec les vitesses théoriques autorisées, nous voulons évaluer l'impact de la hiérarchisation des routes sur les distances parcourues par les véhicules selon les réseaux. De la même manière, nous évaluons l'impact de la hiérarchisation des routes sur ces différentes performances.

2.1 Méthode employée

Bien que les couvertures des réseaux aient été choisies arbitrairement et de la même manière la longueur totale des réseaux et le nombre de tronçons,

la longueur moyenne des tronçons peut être considérée comme représentative des réseaux. En les comparant, on retrouve certaines observations faites sur les réseaux au préalable, avec notamment, d'une part, les réseaux qui sont localisés en plaine (Dallas et Rennes) dont la longueur moyenne des tronçons est réduite (respectivement 103 et 108 mètres), avec des écart-type modérés (de 1 à 1,3 fois plus important que la moyenne avec 106 et 140 mètres); et, d'autre part, ceux qui ont été développés sur des territoires accidentés, avec des obstacles topographiques forts (Grenoble et Nice) pour lesquels on observe une longueur moyenne des tronçons similaires avec un écart-type égal à 1,45 à 1,54 fois celle-ci. Les tronçons de route sont globalement plus longs dans le deuxième cas. Il y a donc moins d'intersections, ce qui induit des distances à parcourir potentiellement plus longues.

On applique sur chacun des réseaux routiers le même semis aléatoire de 100 arrêts qui constitue la base du réseau d'origine-destination (OD). Seul dans le cas de Nice, le semis a été pivoté pour respecter l'orientation du territoire imposée par la situation littorale. Les distances à vol d'oiseau entre les arrêts sont donc identiques. On crée un réseau d'OD constitué de 500 demandes de déplacement théoriques, sans contrainte spatiale ou temporelle. Un déplacement est possible entre tous les arrêts à n'importe quel moment de la journée. Nous pouvons ainsi comparer les distances parcourues sur chaque réseau pour répondre à un même scénario de déplacement. Nous utilisons le calcul du taux de croissance pour évaluer l'impact de la hiérarchisation des réseaux avec la vitesse sur les distances parcourues, ou encore l'augmentation des distances parcourues. Ce choix méthodologique a été contraint par l'aspect applicatif du projet duquel cette analyse est issue.

2.2 Effet de la morphologie des réseaux sur les distances parcourues

Nous commençons par analyser les distances parcourues sur les réseaux routiers avec une vitesse de circulation constante (60 km/h) de manière à n'analyser que les effets de leurs caractéristiques morphologiques. Comme nous pouvons le constater dans le tableau 3, les caractéristiques du réseau de Dallas permettent de minimiser les distances parcourues. La matérialisation du réseau de déplacements, optimisée en temps, sur ce réseau routier engendre une distance totale parcourue relativement réduite (11 922 km). Cela reste tout de même comparable à la distance parcourue par la matérialisation sur le réseau de Rennes (12 563 km). En revanche, comme pressenti avec la comparaison des longueurs moyennes des tronçons, les réseaux de Grenoble et de Nice engendrent des kilométrages plus importants, respectivement 16 310 et 16 645 km.

La mise en correspondance de ces distances globales et des indices descriptifs révèle un ordre identique des réseaux. En effet, que ce soit par rapport à l'indice de détours moyens (du plus important au plus faible) ou de l'efficacité moyenne des plus courts chemins en temps moyens (du plus important au plus faible), on retrouve dans l'ordre croissant Dallas, Rennes, Grenoble et Nice (tableau 3).

TABLEAU 3 – Distances parcourues selon les réseaux routiers

Réseau	Distance (km)
Dallas	11 922
Rennes	12 563
Grenoble	16 310
Nice	16 641

La longueur moyenne des tronçons conditionne la possibilité d'effectuer des détours. Plus les tronçons sont grands, moins il y a d'alternatives de chemin pour un même trajet sur le réseau. Ainsi, les distances globales parcourues pour répondre à une demande de déplacement sont plus importantes lorsque la longueur moyenne des tronçons est grande. Adjointe aux valeurs de l'indice de détour moyen et d'efficacité des trajets optimaux en temps (tableau 4), cette information permet d'identifier quantitativement deux types de réseaux : les réseaux établis en plaine, sans contrainte topographique forte, et ceux développés sur des terrains un peu plus accidentés (montagne notamment).

TABLEAU 4 – Indicateurs de description des réseaux

Réseau	Distance totale	Indice de	Efficacité moyenne	Longueur moyenne
	réseau (km)	détour moyen	PCC (km/h)	des tronçons (m)
Dallas	18 510	0.841	50.48	103
Rennes	12 246	0.827	49.64	108
Grenoble	10 912	0.658	39.45	143
Nice	10 566	0.624	37.44	146

2.3 Effets de la hiérarchisation des réseaux par la vitesse sur les distances parcourues

On étudie désormais l'impact de la hiérarchisation des routes par les vitesses maximales autorisées sur ces mêmes réseaux. On emploie les valeurs de vitesses maximales indiquées précédemment. La hiérarchisation des routes par la vitesse provoque une augmentation générale des distances parcourues (tableau 5). Les plus courts chemins en distance se détournent du plus court chemin en temps pour rejoindre les voies les plus rapides, avec toutefois des différences entre le degré de hiérarchie et le nombre de voies rapides. On observe ainsi une augmentation des détours des trajets par rapport à la géographie euclidienne (soit une diminution de l'indice de détour) et de la sorte des distances parcourues. Avec nos scénarios, on constate une augmentation des distances de près de 5% sur le réseau de Dallas contre près de 17% sur le réseau de Nice, soit respectivement 588 et 2 811 km.

TABLEAU 5 – Comparaison distances entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé

Réseau		Distance (km)	Augmentation (%)	Valeur absolue (km)
Dallas	Constant	12 510	4,9	588
	Hiérarchisé	17 842		
Rennes	Constant	13 999	11,4	1436
	Hiérarchisé	19 312		
Grenoble	Constant	18 660	14,4	2350
	Hiérarchisé	26 342		
Nice	Constant	19 452	16,9	2811
	Hiérarchisé	26 950		

La hiérarchisation des routes par la vitesse implique également une diminution de l'indice de détour moyen sur les réseaux (tableau 6). Pour rappel, un indice de détour élevé signifie que les détours sont moins importants. Cette dégradation de l'indice de détour est notablement plus faible sur le réseau de Dallas (-3,6 points) que sur les autres réseaux (Rennes, -6,1 ; Grenoble, -7,3 ; Nice, -8,6 points). Dans la logique de minimisation des temps de trajets, les véhicules utilisent préférentiellement les voies les plus rapides.

L'application des vitesses sur les réseaux routiers engendre donc une modification du tracé des plus courts chemins en temps et donc leur longueur. La variation de l'indice de détour observée ici révèle une propension plus forte des réseaux français à l'augmentation des distances parcourues lorsque que l'on cherche à minimiser le temps de transport. Cela affecte l'efficacité des trajets.

En effet, dans le calcul de l'efficacité moyenne des plus courts chemins, on divise la distance parcourue sur le réseau par le temps de parcours à vol d'oiseau entre deux points. Une distance importante du plus court chemin en temps sur le réseau n'implique donc pas forcément une efficacité plus faible, cela dépend de la vitesse pratiquée. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'application des vitesses « réelles » améliore significativement l'efficacité moyenne des trajets de certains réseaux par rapport à la vitesse moyenne de 60 km/h (Dallas, +28,9 km/h et dans une moindre mesure Rennes, +12,6 km/h). Pour d'autres réseaux, comme celui de Nice, l'application des vitesses réduit l'efficacité des trajets (-3 km/h). Cela revient à dire que l'efficacité du réseau de Nice, hiérarchisé, se situe en dessous de 60 km/h, alors que celle du réseau de Dallas se trouve bien au-dessus de 60 km/h.

Il semble ainsi que l'amélioration de l'efficacité moyenne des plus courts chemins sur un réseau relève d'une balance entre les distances à parcourir et les vitesses appliquées sur le réseau propres aux caractéristiques de chacun. Une bonne efficacité peut permettre de minimiser les temps de trajet tout en régulant les distances à parcourir.

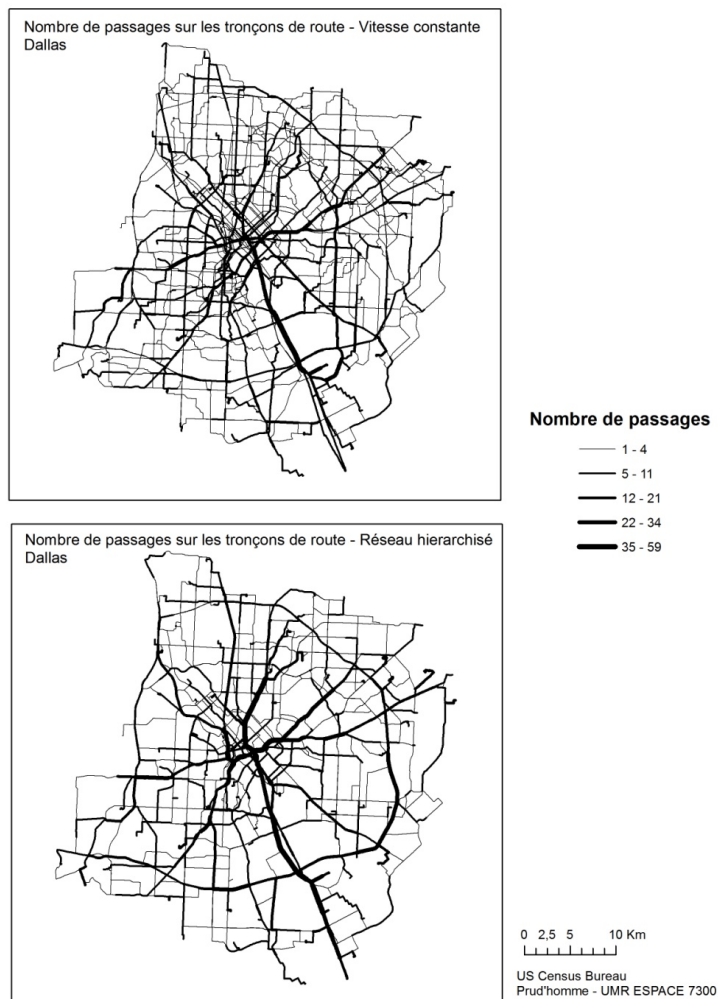
TABLEAU 6 – Modification des indices « réseau » avec l'application des vitesses sur les réseaux

		Indice de connectivité	Indice de détour moyen	Différence détours	Efficacité moyenne des pcc en temps (km/h)	Différence efficacité (km/h)	Distance moyenne par véhicules
Dallas	Constant	0,45	84,14	-3,6	50,48	28,9	23,8
	Réel		80,53		79,40		25
Rennes	Constant	0,4195	82,73	-6,1	49,64	12,6	25,1
	Réel		76,64		62,27		28
Grenoble	Constant	0,42	65,76	-7,3	39,45	1,9	32,6
	Réel		58,43		41,34		37,3
Nice	Constant	0,4	62,40	-8,6	37,44	-3,0	33,3
	Réel		53,85		34,48		38,9

L'observation faite sur le réseau de Dallas peut s'expliquer par la capacité du réseau secondaire « orthogonal » à diriger les flux vers les voies du réseau primaire à grande vitesse. On constate sur les cartes suivantes (figure 20) la concentration massive des flux avec la hiérarchisation des routes avec la vitesse. Ainsi, d'un réseau de déplacement spatialement réparti de manière plutôt homogène on obtient un réseau concentré sur quelques axes avec la hiérarchisation par la vitesse. Si le premier est plus petit du point de vue des distances parcourues, il est plus étendu spatialement. La hiérarchisation des voies de circulation d'un réseau routier par la vitesse a ainsi un impact direct sur la taille du réseau de déplacements.

Nous avons vu dans cette section la manière dont la morphologie des réseaux peut jouer sur les distances parcourues par les véhicules. Nous avons constaté la nécessaire balance à faire entre distance parcourue et vitesse appliquée sur le réseau pour obtenir une meilleure efficacité des chemins les plus rapides sur un même réseau routier. Nous avons également pointé l'impact de l'introduction de vitesses hiérarchisées sur ces mêmes distances. La modification des vitesses sur un réseau routier a un effet indirect sur les distances parcourues en impliquant une modification de la hiérarchie des routes et ainsi le tracé des chemins les plus rapides.

FIGURE 20 – Localisation des flux matérialisés sur le réseau de Dallas selon la hiérarchisation des tronçons de route



Conclusion

Nous avons observé que, d'un même réseau de flux, différents réseaux de déplacements sont envisageables. La géométrie d'un réseau de déplacements

est donc certes la conséquence du réseau de flux dont il est issu mais pas uniquement : le réseau routier sur lequel il se matérialise se place comme contrainte spatiale à son déploiement et ainsi comme variable à part entière dans l'appréhension des émissions de polluants engendrées par les déplacements.

L'augmentation des distances a un impact direct sur les émissions de polluants (émissions proportionnelles à la distance parcourue). On considère communément le réseau routier comme donné mais connectivité et hiérarchie ont de forts impacts sur les distances parcourues et ainsi sur les émissions de polluants. Ces paramètres peuvent donc être des leviers d'aménagement efficaces pour une amélioration de la qualité de l'air. Comme le réseau est « hérité », il est plus facile d'agir sur les caractéristiques fonctionnelles (vitesse) que sur les aspects topologiques et morphologiques des réseaux.

Vers une typologie des inversions urbaines par l'infrastructure. L'exemple de Detroit, Michigan

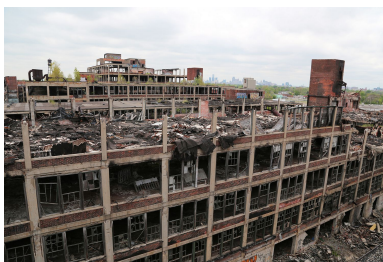
Stéphane SADOUX⁶ et Tricia MEEHAN⁷

Introduction

Lorsque l'on pense à Detroit aujourd'hui, ce sont les images du plafond effondré de l'usine Packard, les vitres brisées de la *Michigan Station* et les parcelles vacantes du quartier autrefois huppé de *Brush Park* qui peuvent venir à l'esprit (figure 21).

Ces images fortement médiatisées semblent avoir convaincu le monde que le cas de Detroit, l'enfant modèle du capitalisme, est aujourd'hui désespéré. Les images de son déclin, récemment véhiculées par les médias, racontent toutefois une histoire partielle, celle du *ruin porn* pour reprendre l'expression des locaux (Millington, 2013 [71]). L'état de délabrement des infrastructures et du bâti de certains quartiers tend en effet à occulter une autre réalité : celle d'un renouvellement incrémental mais bien réel, le plus souvent basé sur des initiatives de la société civile plus que de l'administration asphyxiée qui a progressivement perdu ses prérogatives.

FIGURE 21 – L'usine Packard (à gauche) et *Michigan Grand Station* (à droite)



Source : http://assets.blog.hemmings.com/wp-content/uploads/2013/06/Packardplant_03_1500.jpg, consulté le 14 juin 2014 (gauche) ; Tricia Meehan (droite)

7. Laboratoire Cultures Constructives LabEx Architecture, Environnement & Cultures Constructives

Dans un article récent, Peter Eisinger se demandait « Detroit est-elle morte ? » (Eisinger, 2013 [33]), soulignant que la plupart des écrits parus ces dernières années relèvent d'un constat d'agonie sans pour autant avancer de solutions pour stimuler la résilience de la métropole. Symbolique d'une volonté de résilience, et élaboré sur la base d'une très large concertation avec les habitants de la ville, le *Detroit Framework* (*Detroit Works Project Long-Term Steering Committee*, 2013) propose un ensemble de stratégies qui, pour reprendre l'expression d'Alan Ehrenhalt (2012 [32]), visent l'inversion urbaine. Ces leviers d'action sont notamment fondés sur deux idées fortes : d'une part, considérer le paysage comme une forme d'infrastructure capable de mailler le territoire urbain, de répondre à des enjeux liés à l'écologie et à la santé, et de se faire support de flux et d'usages diversifiés ; d'autre part, diversifier les modes de transports à la disposition des habitants qui, lorsqu'ils ne disposent pas d'un véhicule, sont aujourd'hui laissés pour compte et contraints à l'immobilité.

Le *Detroit Framework* propose de traiter l'infrastructure de la ville selon cinq types d'approche. Trois d'entre elles, qui relèvent essentiellement de la modernisation et de l'entretien des principales artères de circulation, ne seront pas traitées ici : elles représentent à bien des égards un *statu quo* en termes d'usages et de fonctions. Cet article s'intéresse aux deux autres formes d'intervention dont l'objectif est au contraire d'inverser une situation : la première vise à réduire l'infrastructure ; la seconde à la remplacer, la réaffecter ou la déclasser.

Notre objectif sera dans un premier temps de dresser une typologie de ces méthodes d'intervention qui sont avant tout des stratégies et des leviers d'action dont les caractéristiques et composantes peuvent être identifiées et classées. Nous proposerons dans un second temps d'illustrer ces types d'intervention par des projets et des situations à Detroit qui démontrent les possibilités offertes par des actions d'inversion : celles de rendre habitables des espaces autrefois dédiés exclusivement à la circulation des trains ou des automobiles.

Detroit : croissance des réseaux et de l'infrastructure

Notre objectif n'est en aucun cas de prétendre expliquer avec précision les raisons complexes du déclin de la ville de Detroit. Nous nous contenterons ici de souligner quelques événements et facteurs qui ont marqué l'histoire des infrastructures de cette ville, au prisme de la question de la croissance des réseaux.

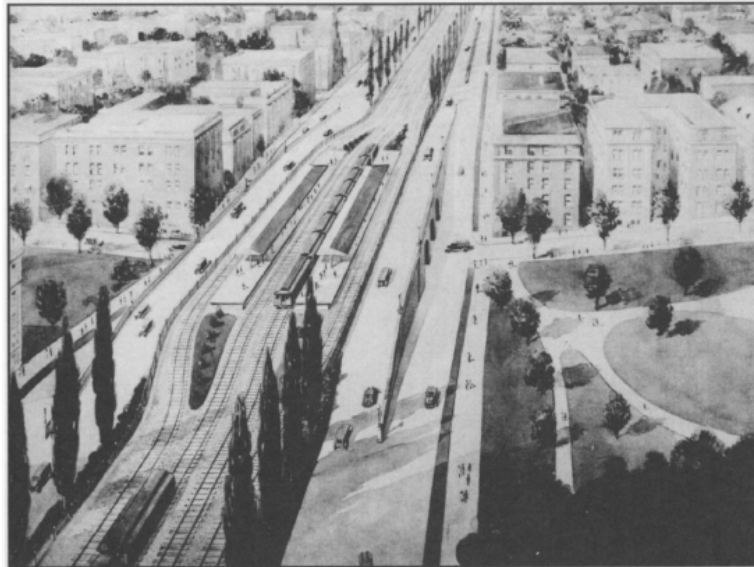
Rappelons en préambule que les définitions du terme « infrastructure » sont nombreuses. Nous proposons ici de reprendre celle proposée par Jason Baren (2009 [4]) pour qui ce mot renvoie aux systèmes, services et équipements publics à grande échelle d'un pays ou d'une région qui sont nécessaires à l'activité économique. Baren distingue l'infrastructure économique d'une part, qui comprend notamment les voies rapides, les réseaux dédiés à l'eau et aux égouts, à l'énergie, aux télécommunications, et l'infrastructure sociale d'autre part, laquelle englobe les écoles, universités, hôpitaux, logements sociaux et établissement pénitenciers. Nous proposons en outre de distinguer ce que les anglo-saxons nomment *hard infrastructure*, en d'autres termes l'infrastructure physique d'une ville, et *soft infrastructure*, expression qui se réfère aux systèmes d'administration, de gestion et de gouvernance.

Conçues pour favoriser la mobilité de deux millions d'habitants, les infrastructures routières quadrillent la région urbaine de Detroit pour en assurer le maillage. Mais leur gabarit et la rareté des franchissements en font des barrières autant que des connexions : la trame viaire, destinée à l'automobile qui fit la renommée de la ville, sépare autant qu'elle relie. Depuis les années 1960, l'infrastructure a nettement contribué à diviser et à fragmenter la ville (Ryan et Campo, 2013 [94]).

Au cours des années 1920 et 1930, des *parkways* sont conçus et réalisés dans plusieurs grandes villes des États-Unis, notamment à Chicago et New York, dans le but de réduire la congestion automobile le long des principaux axes de circulation et de diversifier les modes de circulation - en vain (Bauman, 1991 [6]). À Detroit, la *Detroit Rapid Transit Commission*, fondée en 1922, propose la mise en œuvre d'un *superhighway*, long de 225 miles (figure 22). Inspiré par les *parkways*, il ferait partie d'un réseau multimodal plus important, intégrant un réseau ferré urbain rapide. Ce projet ne sera jamais mis en œuvre, au profit de l'automobile (Brown, 2005 [16]). Hyde (2006 [52]) souligne que cet échec est en grande partie dû à l'absence de financements disponibles pour les infrastructures ferroviaires : les taxes perçues sur la vente de carburant pour les automobiles sont alors exclusivement allouées à la construction d'infrastructures routières. Jones (2007 [56]) précise pour sa part qu'à Detroit comme à Los Angeles, le *downtown* ne souhaite alors pas contribuer au financement des tronçons enterrés d'un tel projet.

Dans ces mêmes villes, et d'autres (Dallas, Washington, San Francisco, Pittsburgh), de vastes programmes de construction d'*express highways* sont alors initiés (Bauman, 1991 [6]). À Detroit, ces mesures, prises peu après la seconde guerre mondiale, sont antérieures à l'*Interstate Highway Act* de 1956. Dans la *Motor City*, il s'agit alors de remédier au vieillissement des infrastructures routières et à leur saturation, mais également et par-dessus

FIGURE 22 – Perspective du *superhighway* proposé par la *Detroit Rapid Transit Commission* en 1923



Source : *Burton Historical Collection*, Detroit Public Library

tout d'irriguer le *Central business district* en déclin (Biles, 2014 [12]) en le reliant au reste de l'aire urbaine grâce à des voies rapides. Ce déclin du centre-ville n'est pas un phénomène propre à Detroit : il est observé dans la plupart des métropoles nord-américaines dans l'après-guerre (*Bureau of Labor Statistics*, 1967 [75]). Mais il est particulièrement marqué dans ce berceau de l'industrie automobile. Au cours des années 1950, et sous le mandat du maire Albert Cobo, l'accent est donc mis sur ce mode de transport aux dépens des transports en communs (Biles, *op. cit.*). Même le président de la *Detroit Rapid Transit Commission* parlera de l'automobile comme « tapis volant » pour « toute l'humanité » (cité dans Frost, 2001 [35]). Il n'en reste pas moins que les autoroutes urbaines installées au sein de la ville seront relativement mal accueillies tant elles sont perçues comme des « poignards dans le cœur de la ville » (DiMento, 2009 [28]).

C'est ainsi qu'au cours du 20^e siècle, le réseau routier affiche une forte croissance tant en termes de kilomètres construits qu'en termes d'échelles : la rue traditionnelle, qui accueille différents flux et usages, est dans une certaine mesure supplantée par les *highways*, dont les emprises très larges sont exclusi-

vement réservées aux véhicules motorisés. Dans leur étude de la nature et de la forme des réseaux routiers de Detroit, Psarra *et al.* (2013 [89]) ont rappelé le rôle des rues traditionnelles dans la constitution du tissu économique et social d'une ville, soulignant en outre que la présence d'un réseau de tramway à Detroit au début du 20^e siècle avait nettement contribué à la vitalité des principaux axes routiers de la ville, supports notamment d'activités commerciales et de flux diversifiés (autos, piétons, transports en communs), au sein d'un réseau au maillage solide et au grain fin. En témoigne une photographie de Woodward avenue, datant de 1907 (figure 23), qui n'est pas sans rappeler le projet actuel d'installation d'une ligne de tramway sur ce même axe : le M1 Rail (figure 24).

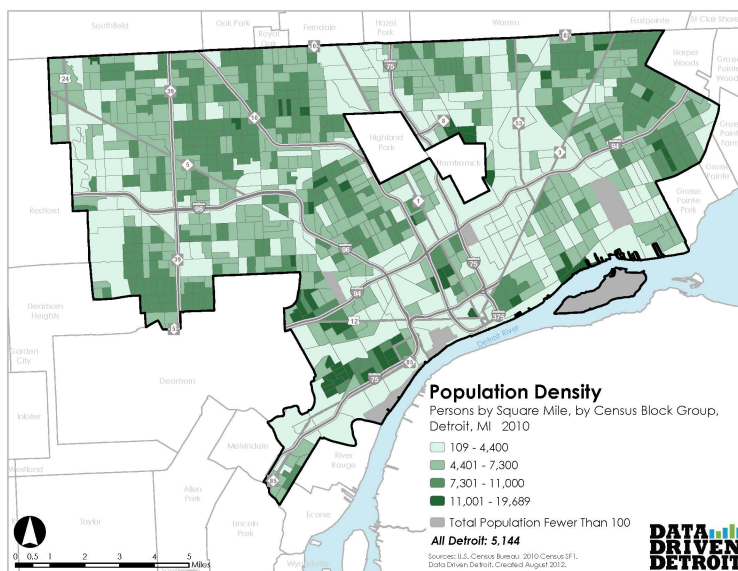
FIGURE 23 – Woodward Avenue en 1907



Source : *Burton Historical Collection*, Detroit Public Library

Nous l'avons souligné en introduction : toute la ville n'est pas en ruines aujourd'hui. Certains quartiers se sont maintenus, et d'autres, notamment Midtown, affichent une certaine croissance. À Lafayette Park, ensemble de logements dessinés par l'architecte Mies van der Rohe, les prix sont au-dessus du marché (*Detroit Curbed*, 2014). Les deux entreprises de Dan Gilbert,

FIGURE 25 – Densités de population par mile carré



Source : *Data Driven Detroit*

Il n'en reste pas moins que celles et ceux qui vivent toujours à Detroit doivent aujourd'hui assumer financièrement l'entretien et la rénovation d'une infrastructure conçue pour une population 2,5 fois plus importante : les taxes locales sont de ce fait élevées, et les services minimum - au mieux. Si la situation de Detroit interroge le rapport de l'infrastructure à la ville, c'est sans doute au prisme de la culture américaine que la question se pose à l'échelle du pays tout entier. Kaplan soulignait il y a trente ans déjà l'échec des États-Unis dans l'élaboration d'une politique cohérente pour l'infrastructure du pays, avec pour conséquence une dégradation rapide des réseaux, et notamment des infrastructures routières : « nous n'avons pas été des investisseurs avisés » (Kaplan, 1984, p. 245 [59]). Pour McCann (2013 [70]), l'histoire, les partis pris politiques, les habitudes et les orientations de l'industrie des transports américaine ont rendu tout changement de cap dans ce domaine très difficile à mettre en œuvre. Le pays vit toujours sous l'influence du triomphe du réseau d'*interstate highways*.

Il semble important de souligner que le déclin de Detroit est en partie lié à une politique fédérale en matière d'infrastructure qui a émergé au cours

de la seconde guerre mondiale et qui s'est accélérée par la suite au cours de la Guerre Froide. Le gouvernement fédéral met alors en place une politique de décentralisation, en subventionnant les industries liées à la défense qui s'installaient à l'extérieur du centre-ville, afin de minimiser les effets d'une potentielle attaque ennemie. La puissance accrue des États du sud au cours de la Guerre Froide est alors accompagnée d'un fléchage des dépenses dans le domaine de la défense vers le Sunbelt, aux dépens de Detroit. Conséquence de la réduction drastique des contrats dans le secteur de la défense, les trois plus grands constructeurs d'automobiles, les *Big Three*, sont alors davantage exposés aux fluctuations économiques, leurs revenus étant de plus en plus dépendants des ventes d'automobiles (Sugrue, 1996 [103] ; Martelle, 2010 [69]). Il est compréhensible qu'un tel changement de cap dans le domaine de l'infrastructure fédérale nécessite une réorganisation à l'échelle locale à Detroit. Mais soixante ans auront au final été nécessaires pour remettre en question de manière significative le *statu quo* qui prévalait en matière d'urbanisme.

De nouvelles formes d'action publique

Parmi les termes employés pour qualifier les nouvelles formes d'action publique en faveur des villes rétrécissantes, celui de *rightsizing* mérite ici d'être explicité. À notre connaissance, il n'existe aujourd'hui pas d'équivalent dans la langue française pour exprimer le sens de ce terme qui, traduit littéralement, se réfère au fait de donner à quelque chose la bonne dimension. Le dictionnaire Oxford définit ce mot comme l'action de « convertir quelque chose » pour lui « donner une taille optimale », citant l'exemple d'une entreprise dont la taille serait réduite par le licenciement d'une partie de son personnel.

Dans un article récent, Janet Anderson (2011 [3]) s'est penchée sur les mesures prises par certaines villes, et plus particulièrement Detroit, afin d'adapter la taille de leur gouvernement local à leur situation actuelle. Elle souligne l'absence de travaux de recherche scientifiques portant sur le *rightsizing*, et souligne qu'une telle approche est traduite dans les faits par différents types d'action : le retranchement, la restructuration, la réorganisation, la réingénierie et les réductions.

La faillite récente de Detroit offre un cas d'étude contemporain permettant d'interroger l'évolution d'une ville et les manières dont la modification des modes et échelles de gouvernance peuvent accompagner celle de la structure physique de l'aire urbaine, et notamment de l'infrastructure dont la mise en œuvre et l'entretien reviennent à un secteur public à bout de souffle. Diverses mesures ont été prises par les maires successifs, notamment en 2005

par Kwame Kilpatrick dont l'objectif était d'anticiper une chute de recettes avoisinant les \$250 millions. Fondées sur la mutualisation des moyens au sein des différents services de la municipalité, ces mesures ont également en grande partie consisté en une réduction de nombre de ces services et à une hausse de la sous-traitance.

Au cours du mandat de Dave Bing, les réflexions ne portent plus uniquement sur la nature et le fonctionnement du gouvernement municipal, mais également sur des questions d'urbanisme. Le *Detroit Works Project* est ainsi formé en 2009, et chargé d'initier une réflexion autour des manières dont le foncier vacant pourrait être mobilisé pour produire une forme urbaine plus « viable ». Anderson note ainsi à juste titre une certaine évolution dans l'approche de la ville de Detroit en matière de *rightsizing*, reflet d'une évolution des paradigmes convoqués pour répondre à une crise complexe. Les actions ont à l'origine porté sur la réorganisation des différents services de la municipalité, en d'autres termes sur la structure du gouvernement local. Il s'agit alors de réduire les dépenses et, dans la mesure du possible, d'augmenter les recettes. Elles ont dans un second temps concentré les efforts sur l'amélioration des processus de fonctionnement de la municipalité afin de réduire la palette et le niveau de services (*soft infrastructure*). Enfin, et plus récemment, ces actions ont été complétées par la construction d'une nouvelle forme de pensée ciblée sur une réforme de l'occupation des sols et des infrastructures (*hard infrastructure*). Le paradigme mobilisé lors de cette dernière phase considère le *rightsizing* sous l'angle de « l'environnement bâti, afin, notamment, de faire meilleur usage de l'infrastructure » et de rendre les services plus efficaces (Anderson, *op. cit.*, p. 230).

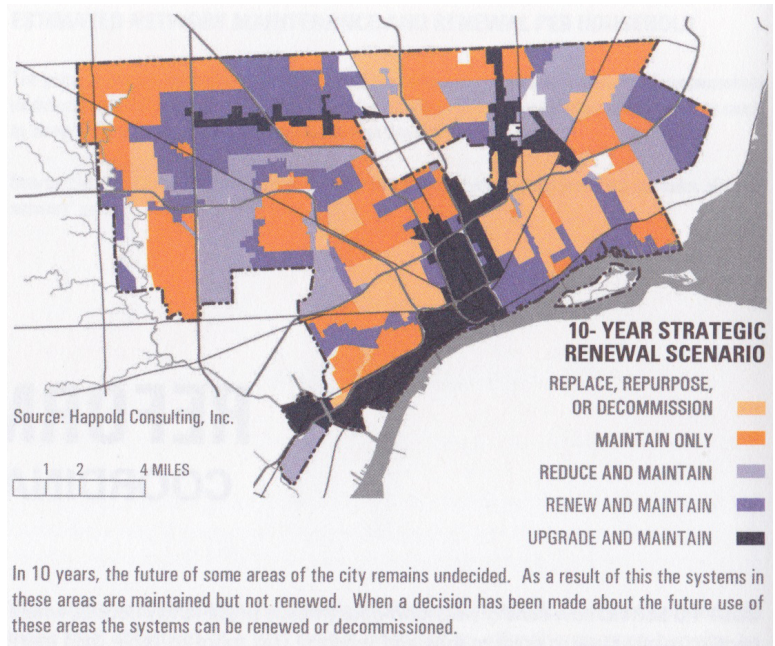
Ce changement de cap est la conséquence d'une initiative financée par une fondation privée rassemblant des acteurs à tous les niveaux. Partant du constat que les changements actuels sont fondés sur des initiatives à l'échelle des individus ou des quartiers, une consultation de 24 mois a donné lieu à la publication du document *Detroit Future City : 2012 Strategic Framework Plan*. L'un des principaux axes de travail dans ce cadre a concerné l'infrastructure : l'eau, les déchets, l'énergie, les transports et les communications. Les propositions sont fondées sur (1) le renouvellement de l'infrastructure stratégique ; (2) le paysage comme infrastructure de la ville du 21^e siècle ; (3) la diversification des modes de transports dans la ville et la région urbaine de Detroit (p. 25).

Décroissance des réseaux : l'infrastructurécotomie dans le *Detroit Framework*

Le *Detroit Strategic Framework Plan* propose cinq types d'approches du renouvellement urbain, chacune d'entre elles correspondant à des espaces de la ville dans lesquels elles pourraient être appliquées. La définition des espaces concernés reflète la densité et les emplois que l'on y trouve, et est fondée sur des projections de croissance ou de rétrécissement futurs (figure 26). Les zones jugées « en bonne santé », en noir, méritent non seulement d'être maintenues en l'état, mais optimisées et valorisées dans la mesure où elles offrent une base pour la croissance future. Les deux zones figurées en mauve et orange foncé sont dans des situations intermédiaires. Dans les zones figurées en mauve, il est proposé de renouveler l'infrastructure tandis que dans les zones oranges, l'intervention porte sur une maintenance à horizon 20 ans et une veille de l'évolution de ces espaces. Les zones figurées en mauve et orange clairs sont celles où la densité est la plus faible, la population est encore en baisse, les opportunités en matière d'emploi peu nombreuses et où la réduction de l'infrastructure pourrait contribuer à rendre plus aisée la maintenance des réseaux dans d'autres parties de la ville. C'est dans de tels contextes, où aucune croissance n'est prévue, que des stratégies relevant d'une approche que nous avons par ailleurs qualifiée d'infrastructurécotomie (Sadoux *et al.*, à paraître [95]) pourraient être envisagées. Ce terme reflète l'idée selon laquelle il est parfois pertinent de procéder à l'ablation volontaire d'une partie de l'infrastructure d'une ville lorsqu'elle ne contribue en rien au bon fonctionnement du système ou qu'elle est devenue inutile, voire néfaste au fonctionnement du système dans sa globalité.

Deux types d'infrastructurécotomie sont proposés dans ces zones (figure 27). Le *Framework* suggère la réduction et la maintenance des réseaux pour les zones en mauve clair et un triptyque de mesures essentiellement axées sur la réduction pour les zones figurées en orange clair : remplacer, réaffecter ou déclasser. Il annonce clairement que l'objectif n'est en aucun cas de cesser de desservir certaines parties de la ville, mais plutôt d'assurer un certain équilibre en offrant les services de base à toute la population tout en investissant davantage dans les zones qui affichent le meilleur potentiel de développement. La question est naturellement de savoir comment parvenir à dimensionner correctement l'infrastructure au bon endroit, afin de répondre de manière efficace à la demande réelle et de créer ou de renforcer des nœuds dans lesquels concentrer les futurs développements. À l'heure actuelle, la moitié des emplois de la ville sont concentrés dans 15% de sa surface et dans

FIGURE 26 – Scénario de renouvellement à dix ans



Source : *Detroit Framework*

FIGURE 27 – Approche stratégique du renouvellement

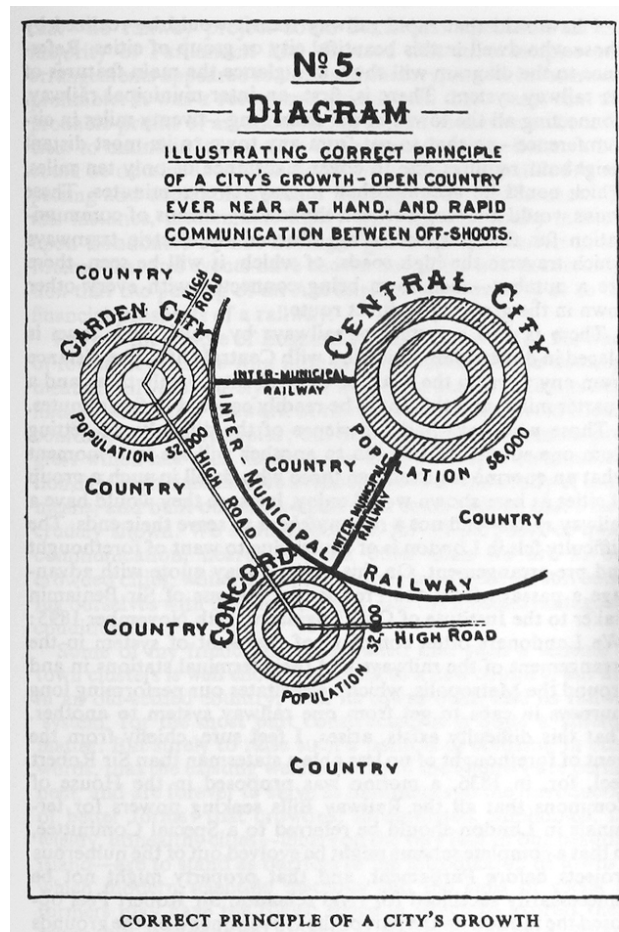
STRATEGIC RENEWAL APPROACHES SUMMARY				
UPGRADE AND MAINTAIN	RENEW AND MAINTAIN	REDUCE AND MAINTAIN	MAINTAIN ONLY	REPLACE, REPURPOSE, OR DECOMMISSION
<ul style="list-style-type: none"> Service Level: Improved service level maintained at better quality Actions: Fully maintain and undertake renewal or upgrade as required Outcomes: Improved neighborhood with increase capacity and resilience 	<ul style="list-style-type: none"> Service Level: Core service level at the same or better quality Actions: Fully maintain and renew at current level or upgrade if required Outcomes: Viable neighborhood with same or increased capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Service Level: Core service level but for a smaller number of residents as these areas are unlikely to regain residents to historic population levels Actions: Maintain and undertake scheduled renewal at lower capacity Outcomes: Area continues as viable neighborhood with lower capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Service Level: Basic service level but quality declining over time Actions: Planned maintenance extending current systems life Outcomes: By 20-year horizon, systems are either renewed at full or reduced capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Service Level: Basic service level but quality declining over time Actions: Planned maintenance to extend current systems life Outcomes: Area transitions from current use in 20-25 years. Systems eventually retired.

Source : *Detroit Framework*

7 clusters clairement distincts. Ces zones seraient prioritaires en matière de renouvellement et de modernisation de l'infrastructure.

La logique proposée n'est pas sans rappeler le modèle des cités jardins de Ebenezer Howard (1898 [49]), qui visait un certain équilibre entre ville et campagne. Dans la mesure où Detroit n'a jamais été une ville dense, et compte tenu des identités très fortes de chacun des quartiers qui caractérisent la ville, le projet de Howard qui consiste à regrouper des cités jardins autour d'une cité centrale (ici, le *central business district*) a en effet beaucoup de sens (figure 28). Les réseaux de transports sont de la plus grande importance dans ce type de modèle d'urbanisation, et ils représentent d'ailleurs l'un des éléments clés du *Framework*, à différentes échelles. L'amélioration des connexions entre les centres des différents quartiers et les emplois est une priorité, tandis que les zones dont la densité est plus faible pourraient être desservies grâce à un service de transports à la demande flexible, à plus petite échelle (*Detroit Works Project*, 2013, p. 7).

FIGURE 28 – Le modèle d'urbanisation des *garden cities* proposé par Howard



Source : Howard (1898)

Les propositions du *Framework*

Notre article porte sur deux des trois types d'actions définies dans le *Framework* dans le chapitre intitulé *City Systems Elements* : le renouvellement de l'infrastructure, et le paysage comme infrastructure (*Detroit Works Project*, 2013, p. 25). Elles sont les plus pertinentes pour traiter les zones où la vacance est importante. Le troisième type d'action, qui porte sur la diversification des modes de transport pour la ville et la région urbaine, vise

à améliorer les connexions entre les nœuds d'activité et de développement plus denses. Ces actions auront un impact plus direct sur les zones figurées en noir, orange foncé et mauve foncé.

Ces trois types d'actions visent conjointement à ajuster une infrastructure désormais surdimensionnée et sujette à un sous-investissement, afin de la transformer en un réseau soutenable et efficace. Le renouvellement de l'infrastructure stratégique et le paysage comme infrastructure sont en réalité des actions complémentaires dans les zones où la vacance est importante. Elles seront ici dans un premier temps abordées au travers des stratégies générales proposées par le *Framework*. Nous proposons dans un second temps de nous pencher sur certaines des propositions concrètes élaborées pour l'une des zones de forte vacance identifiée : *Middle East Central Detroit*, et plus spécifiquement le projet pour le renouvellement de *Bloody Run Creek Greenway*, élaboré en 2011.

Stratégie générale : *rightsizing*

Le *Framework* traite l'infrastructure stratégique en se basant sur l'idée selon laquelle les réseaux doivent être réajustés dans leur taille, mais également de manière à permettre de soutenir la transition de la ville industrielle, au sein de laquelle les infrastructures étaient très sollicitées, à une ville où la croissance économique se fait dans cinq principaux secteurs (technologie, création, médecine, commerce, formation et industrie, ce dernier secteur étant très lié à l'industrie de la construction). Il est ainsi possible d'imaginer un système différent, axé sur les *clusters* d'emplois existants. Ce système devra également répondre aux besoins des zones de forte vacance, dans lesquelles les populations, souvent peu aisées et victimes du chômage, se sont tournées vers des activités d'artisanat ou d'agriculture pour survivre.

La coopération entre les différents services de la ville est essentielle pour espérer mettre en œuvre un tel réseau, à la fois efficace et différencié. Les décisions relatives à la modernisation, à la réduction ou au déclassement de certaines infrastructures doivent être prises conjointement pour parvenir à créer un système d'infrastructure intégré qui réponde à une logique d'ensemble partagée. Cette approche permettrait d'accroître l'efficacité des réseaux, mais également de minimiser les doublons. En évitant collectivement des travaux de rénovation et de maintenance d'infrastructure inutile, les financements disponibles pourront être fléchés vers des zones où le retour sur investissement est évalué comme étant plus important.

Il semble ici pertinent de s'interroger sur la notion de « taille adéquate » pour une ville comme Detroit. Un certain nombre de stratégies sont actuel-

lement en cours de discussion ou de mise en œuvre. Dans les zones à faible densité où l'on prévoit une stabilisation, plusieurs initiatives sont projetées. En supposant que l'occupation des sols dans ces zones relèveraient du *live + make* et du *green residential*, plusieurs approches doivent être mises en œuvre, notamment la réduction de la capacité du réseau d'alimentation en eau et en gaz, et la réorganisation de la gestion des déchets sur la base d'un tri et de collectes fondées sur des temporalités adaptées à chaque type de déchet. Il s'agit également de mettre en place une offre de transports à la demande, grâce aux nouvelles technologies. Dans les zones à forte vacance encore en déclin, où l'infrastructure est la plus ancienne de la ville, le *Framework* propose une transition dans l'utilisation des terres vers de nouveaux usages. Ici, les réseaux seraient remplacés, réaffectés ou déclassés. Un déclassement pourrait consister en une suppression (une « ablation » dirons-nous) de l'infrastructure dans des zones où le taux de vacance est proche de 100%. L'infrastructure routière pourrait elle-même être supprimée afin de pouvoir disposer de larges étendues rendues « vierges » et affectées, par exemple, à la récupération des eaux de pluie. Les quelques résidents restants disposeraient de dessertes par le biais de la nouvelle infrastructure installée pour soutenir les nouvelles formes d'occupation des sols, axées sur l'innovation écologique ou productive (*Detroit Works Project*, 2013, p. 176-177). L'échelle des nouveaux services implantés serait compatible avec une densité trouvée en zone rurale.

Concernant les stratégies à l'échelle de la ville qui pourraient avoir un impact sur ces zones, il paraît important de souligner que l'approche proposée ne concerne plus exclusivement l'infrastructure physique (*hard infrastructure*), mais également des mesures relatives à l'organisation des réseaux et des services (*soft infrastructure*). La décentralisation du réseau de collecte des ordures est une piste actuellement débattue, tout comme les stratégies qui permettraient de réduire la quantité de déchets produits, afin de parvenir à une réduction du volume de déchets incinérés, notamment par le biais d'un important programme de recyclage et de réemploi. Une collaboration avec les industries du secteur de l'emballage pourrait ici permettre de réduire les déchets à la source (*Detroit Works Project*, 2013, p. 170).

En termes d'éclairage public, la ville remplace actuellement les dispositifs existants par des LED, afin de réduire la consommation électrique et, par-dessus tout, la maintenance. Cette action pourrait être combinée à la rationalisation du nombre de dispositifs d'éclairage public et de leur localisation, et en utilisant l'énergie solaire pour alimenter les zones les moins denses. Dans les zones qui présentent un risque d'inondations, la municipalité installe actuellement des noues, des bassins de rétention et des végétaux dans

le cadre de requalifications de voiries, au lieu de mettre en place de nouvelles canalisations (*Detroit Works Project*, 2013, p. 156 et 170). Une telle approche illustre l'idée selon laquelle le paysage est une forme d'infrastructure et qu'il peut faire l'objet d'un traitement à l'échelle d'un quartier et de la ville.

Stratégies générales : le paysage comme infrastructure

Considérer le paysage comme infrastructure est particulièrement pertinent dans les zones de forte vacance où, à la question du devenir du sol libéré suite à la réduction ou à la suppression d'infrastructure, s'ajoute celle du traitement des sols déjà inoccupés, considérés comme peu attractifs visuellement. En réponse à ce problème, le *Framework* souligne l'importance de travailler ces espaces à travers le prisme du « paysage comme infrastructure », le paysage étant ici considéré à la fois comme une forme d'aménité et comme un support de production. Cette approche implique de s'appuyer sur une nouvelle vision de l'infrastructure, et de prendre ses distances par rapport à la vision qui a prévalu au cours du vingtième siècle - une vision essentiellement axée sur et dépendante de l'infrastructure physique et minérale. Cinq types d'occupation des sols possibles sont identifiés dans le *Framework* en fonction du potentiel : des espaces libres à destination de la communauté, des paysages écologiques, des trames vertes et bleues, des paysages productifs, et des paysages de transition (*Detroit Works Project*, 2013, p. 126).

La question des trames vertes et bleues est ici de la plus grande importance. En tant qu'alternative aux réseaux d'infrastructures construits, le paysage pourrait contribuer à la gestion des eaux usées et pluviales. À l'heure actuelle, les réseaux d'évacuation sont les mêmes pour ces eaux et leur dimensionnement ne leur permet pas de traiter les volumes importants d'eau auxquels ils sont confrontés lors de fortes précipitations. Le surplus est actuellement déversé directement dans la Detroit River et dans River Rouge (*Detroit Works Project*, 2013, p. 162). Il est donc nécessaire de réduire les volumes d'eau traités par le réseau pour éviter le déversement des eaux usées dans les cours d'eau. La séparation des réseaux d'eau serait rendue plus réaliste par l'utilisation optimale d'éléments paysagers destinés à gérer les eaux pluviales, réduisant de ce fait les dépenses liées à l'installation de nouvelles canalisations.

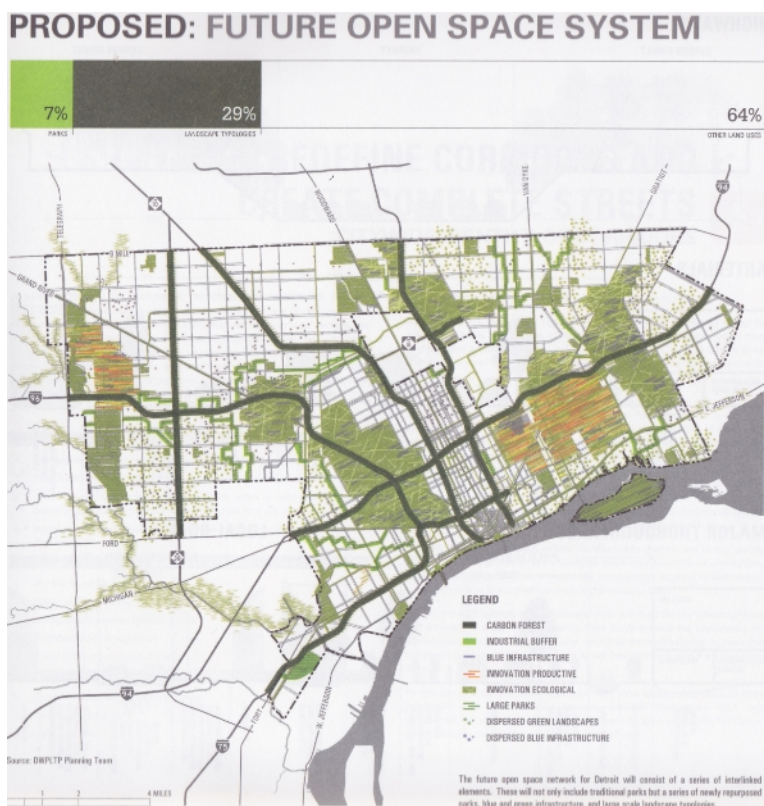
Un travail sur des trames vertes et bleues contribuerait à atteindre ces objectifs. L'infrastructure bleue inclut différents dispositifs capables de recueillir et de purifier l'eau de pluie (bassins de rétention et d'infiltration, étangs, etc.), tandis que l'infrastructure verte inclut des forêts de compensation d'émission de carbone, et des voies vertes qui joueraient un rôle im-

portant dans la réduction du ruissellement et l'amélioration de la qualité de l'air - un autre problème important à Detroit. Les voies vertes seraient dédiées aux modes doux de circulation et permettraient d'effectuer des trajets domicile-travail. Les bénéfices environnementaux d'une telle approche, combinant infrastructure verte et bleue, portent notamment sur l'amélioration de la qualité de l'air, de l'eau et du sol - un progrès au service de l'homme et de la biodiversité. Des retombées économiques sont également prévues, notamment la création d'emplois, et la hausse de la valeur du foncier pouvant attirer de potentiels investisseurs. Soulignons également que ce type d'intervention permettrait de changer l'image de certains quartiers, de les doter d'espaces de loisir, de détente, en d'autres termes de sociabilité (*Detroit Works Project*, 2013, p. 146). Le *Framework* propose ainsi des paysages multifonctionnels visant simultanément à gérer l'eau, améliorer la qualité de l'air, créer de l'emploi et des espaces de loisirs, et permettre de stabiliser des quartiers.

Ces types d'interventions ciblent les zones de forte vacance, mais il est clair que leurs retombées dépasseraient la simple échelle de la ville : le paysage deviendrait une forme d'infrastructure régionale, grâce à une connexion des différents éléments qui forment l'infrastructure verte et bleue. Trois espaces de ce type existent déjà : le *William G. Milliken State Park and Harbor*, le *Detroit River Walk* et *Bell Isle*. Ensemble, ils offrent une base solide à la constitution d'un réseau (figure 29). Le *Framework* propose qu'au sein de la ville de Detroit de 2050, 7% des sols soient des parcs, 29% des espaces paysagers d'autres types, tandis que les 64% restants seraient affectés à d'autres usages, afin de soulager les zones où l'infrastructure est actuellement très dense (*Detroit Works Project*, 2013, p. 135).

Une telle vision peut sembler utopique. L'un des faits qui nous permet de considérer qu'elle est néanmoins possible tient au fait que 44% des propriétés vacantes dans la ville sont détenues par l'un des huit organismes publics fonciers (figure 30) (*Detroit Works Project*, 2013, p. 270). Cet état de fait représente à la fois une opportunité et une difficulté : un problème dans la mesure où la fragmentation de ce foncier détenu par huit organismes différents fait d'une collaboration une condition *sine qua non* à toute forme d'intervention en ce sens. Soulignons également que l'objectif visé n'est pas un retour à un état « naturel », mais plutôt de générer ce que Stephen Vogel, architecte et enseignant, nomme *middle landscape*.

FIGURE 29 – Réseau d'infrastructure paysagère

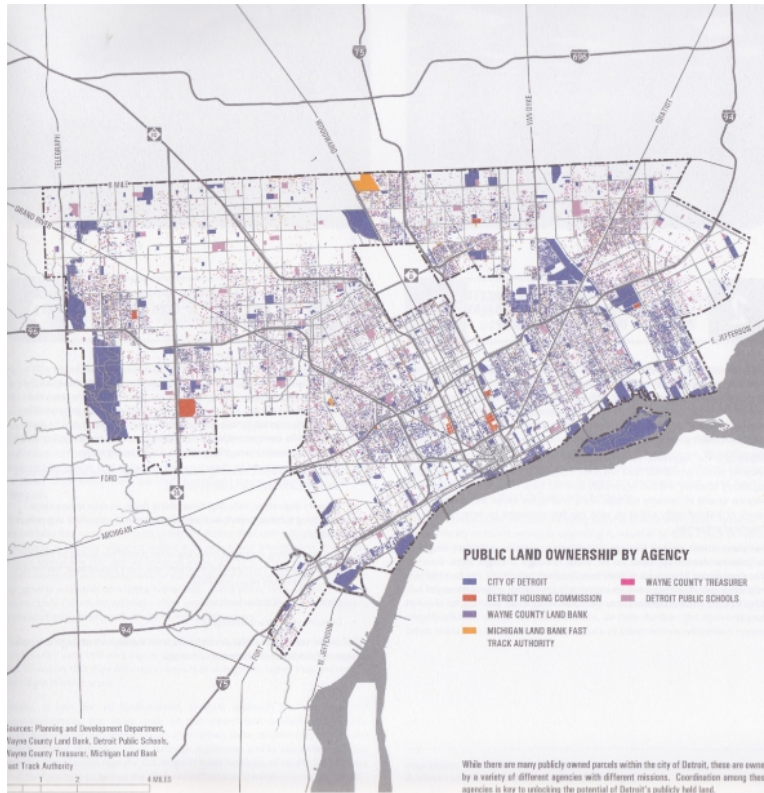


Source : *Detroit Framework*

Étude de cas : *Bloody Creek Run*

Les éléments qui permettent de créer un *middle landscape* sont présents dans le chapitre « Land and Building Assets Element » du *Framework*. Dans cette partie, le comité de pilotage souligne l'importance de la transformation de zones majoritairement vacantes en s'appuyant sur une approche paysagère. Nous illustrons ici cette approche au travers des propositions pour le quartier de *Central East Detroit*. Il est suggéré que cet espace soit utilisé comme espace de production innovante. Il fait partie d'un secteur plus large, qui longe la partie est du *Downtown* et *Midtown* (figure 31). Les cartes figurant les taux de vacance (figure 32) illustrent le fait que le secteur au sud, appelé *The Villages*, relativement dense et stable, est un lieu prisé. Dans la

FIGURE 30 – Réseau d'infrastructure paysagère

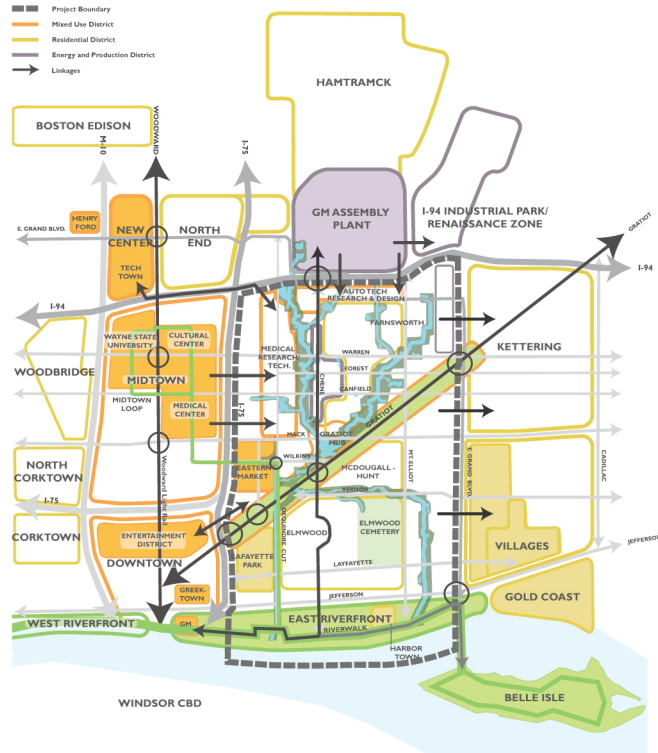


Source : *Detroit Framework*

partie est de ce secteur se trouve le foisonnant *Eastern Market* qui attire des usagers de toute la ville, mais également des *suburbs*. Entre le *Dequinder Cut* et *Downtown* se trouve *Lafayette Park*, qui restera sans doute un lieu recherché. Toutefois, au nord de *Vernor Road* et à l'est de *Mt Elliot*, l'on peut identifier un quartier qui a nettement souffert et qui semble à l'abandon. L'on y trouve très peu d'opportunités d'emplois et le bâti est délabré : ce type de lieu ne justifie pas un entretien de l'infrastructure qui est d'ailleurs arrivée en fin de vie.

Le *Framework* propose une transformation de ce secteur dont la nouvelle fonction relèverait de « l'innovation productive » (figure 33) : agriculture urbaine, forêts cultivées, aquaculture, algoculture, recherche dans le domaine agricole, énergies renouvelables, fermes, campings, prairies d'assainissement

FIGURE 31 – *Bloody Run*

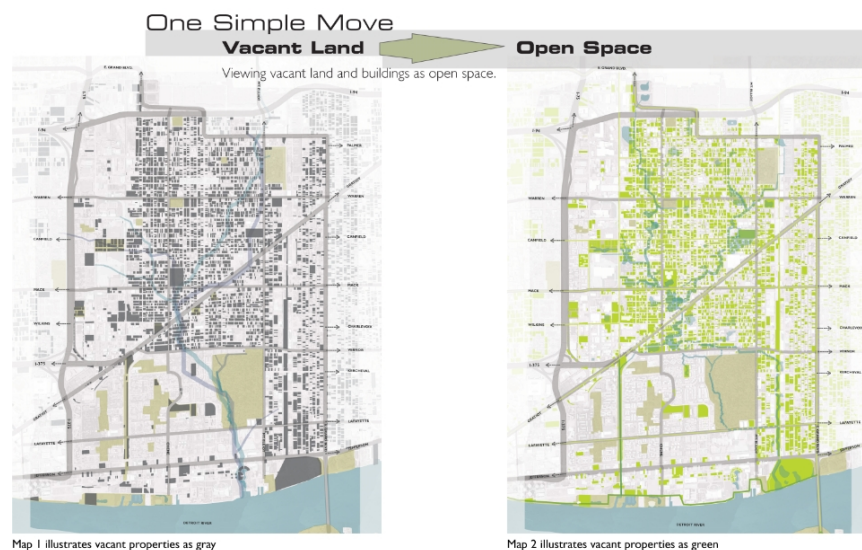


Source : *The Bloody Run Creek Greenway Development Project : Executive Summary*

des sols, etc. (*Detroit Works Project*, 2013, p. 116 et 126 [21]). La proximité du site et de l'*Eastern Market* justifie le fait que ce lieu de production jouxte le lieu où les produits seraient distribués. La proposition est néanmoins « hybride » puisqu'elle inclut également des éléments de « paysage écologique » : la gestion des eaux pluviales se ferait notamment grâce à un étang de rétention, et par la transformation de *Gratiot Avenue* en boulevard capable de gérer les eaux pluviales (*Stormwater boulevard*).

Cette proposition est fondée sur une posture déjà suggérée pour cette zone, fondée sur une réflexion qui a émergé à la fin des années 1970 lorsqu'une agence locale d'architecture, Schervish Vogel and Merz conçut une série de parcs sur berges pour la ville, qu'il voulait voir reliés par un pay-

FIGURE 32 – *Bloody Run* : du gris au vert

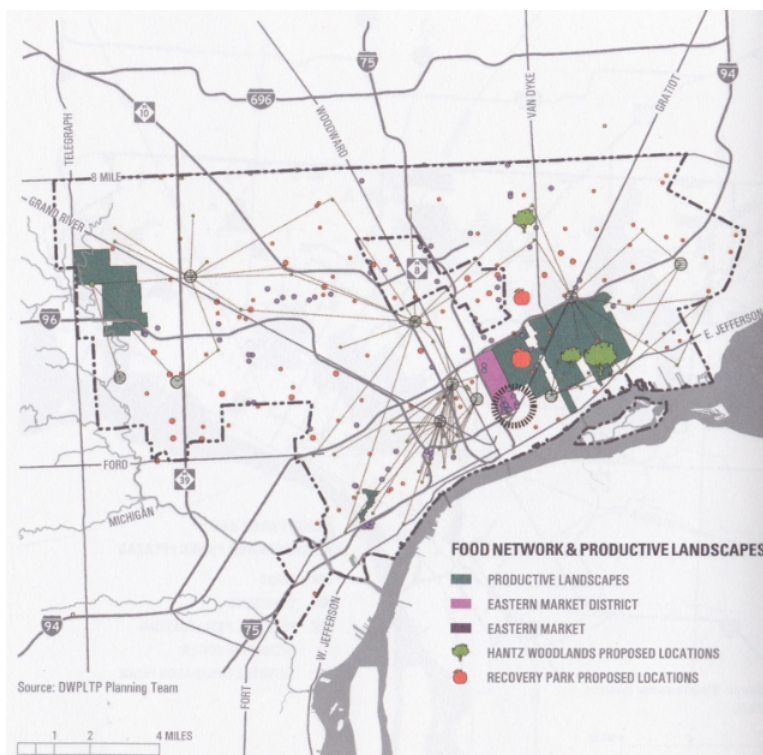


Source : *The Bloody Run Creek Development Project : Executive Summary*

sage créé en rétablissant l'écoulement en surface de *Bloody Run Creek*. Ce ruisseau était autrefois un élément important du réseau de cours d'eau de la ville (figure 34) mais, à l'exception d'une partie à hauteur du cimetière d'Elmwood, il fut enterré lors de l'épidémie de choléra de 1880 et progressivement intégré au réseau d'évacuation des eaux usées au début du 20^e siècle (*Detroit Collaborative Design Center*, 2011 [18]).

Une telle idée, qui pouvait à une certaine époque paraître curieuse, a fait son chemin. En 1993, le maire de l'époque, Dennis Archer, charge SVM d'élaborer des plans pour créer dans ce secteur un parc, centré sur la remise à l'état naturel d'une portion plus importante du ruisseau. L'idée d'un parc de 1 200 hectares fut alors bien accueillie mais elle semblait inenvisageable tant le coût d'une telle opération aurait été élevé. Nonobstant, ce projet est toujours défendu par la ville à l'heure actuelle et Vogel en fait la promotion au travers de l'université de Detroit Mercy, en tant que Doyen et fondateur du *Detroit Collaborative Design Centre*. En 2000, Vogel et Kyong Parek, dirigent ensemble l'atelier *Adamah* (« Terre » en hébreu) auquel participent des étudiants, en lien avec des résidents. Ensemble, ils commencent à développer l'idée d'un village articulé autour de *Bloody Run Creek*. Ce travail

FIGURE 33 – Paysages productifs



Source : *Detroit Framework*

visait à concevoir une communauté auto-suffisante et relevait ainsi d'une certaine manière de l'utopie (Vogel, 2008 [106]), mais elle aura permis de montrer que le paysage a le potentiel de se faire moteur du renouvellement de ce secteur, proposant un environnement entre la ville et la campagne - le *middle landscape*.

Ce projet est récemment entré dans une phase plus réaliste grâce au soutien de Richard Baron, né à Detroit et désormais basé à Saint Louis. Spécialiste de la gestion communautaire dans les secteurs ruinés, il a tenu à contribuer à l'action menée dans sa ville d'origine et parvenu à obtenir d'importants financements de la Kresge Foundation pour permettre à Steven Vogel et au *Detroit Collaborative Design Centre* de poursuivre leur travail, qui s'est achevé en juillet 2011. Le fait que ce projet, à l'instar du *Framework*, combine « innovation écologique » et « innovation productive » n'est pas un

domaine de l'infrastructure et aident à comprendre l'approche que nous avons eu l'occasion de qualifier d'infrastructurécotomie. Il s'agit ici de renforcer les *clusters* existants qui fonctionnent et de redimensionner leur infrastructure. L'étape suivante prend la forme d'une extension de l'infrastructure, en suivant le principe de la greffe. La troisième et dernière étape consiste à relier les différents *clusters* entre eux grâce à des agrafes, le long des principales infrastructures. Les vides entre ces *clusters* pourraient être le terrain d'un travail de réduction ou de déclassement d'infrastructure.

L'espace concerné par la modification de l'occupation des sols est située entre Vernor, au sud, l'axe I-94 au nord, *East Grand Boulevard* à l'est et Dequinder à l'ouest. Cette zone, qui accueillait à une époque des industries et du logement ouvrier, a souffert de l'arrivée de gangs impliqués dans les trafics de stupéfiants à partir des années 1970, lorsque les usines ferment progressivement leurs portes. Au total, 1 270 parcelles ont été concernées par le projet de *Bloody Run Creek*. Parmi elles, 972 étaient déjà entre les mains du secteur public en 2011. Le coût d'acquisition du foncier ne représente donc qu'une faible part du budget de l'opération, estimé à 1 milliard de fonds publics, et supposé générer 3 milliards d'investissements privés (*Detroit Collaborative Design Center*, 2011 [18]).

Le projet de *Bloody Run Creek* est notamment fondé sur une séparation des réseaux : les eaux pluviales seraient essentiellement gérées par des dispositifs paysagers, notamment un *greenway*, articulé autour de l'infrastructure verte et bleue (figure 35), ces dernières comprenant également des fermes expérimentales, des jardins botaniques, des espaces dédiés aux loisirs et à la santé, des pépinières et des jardins productifs. Cette nouvelle infrastructure offrirait également un support pour des modes de circulation alternatifs, notamment la marche à pied et le vélo. Le réseau intègre par ailleurs le *Dequinder Cut rails to trails greenway* dont les deux premiers kilomètres ont été ouverts en 2009. Ce *greenway* est relié au *Detroit East RiverWalk* long de 5,5 kilomètres, et réalisé à 80% à l'heure où nous écrivons ces lignes. L'extension du *West RiverWalk*, d'une longueur avoisinant les 15 miles, est en cours d'étude⁹. La remise au jour de *Bloody Run Creek* et son intégration dans un réseau d'infrastructure verte et bleue participera à réduire la pression exercée sur le réseau de gestion des eaux usées de la ville, en le soulageant de 3 milliards de litres par an (*Detroit Collaborative Design Center*, 2011 [18], figure 36). Outre des modes d'occupation des sols habituels, le projet offre ainsi des opportunités en matière d'agriculture, de recherche, de production alimentaire, d'énergie, de formation, de commerce, et de loisirs, notamment

9. *Detroit Riverfront Conservancy*, <http://detroitriverfront.org/>, consulté 12 juin 2014.

FIGURE 35 – Projet de *Bloody Run Creek*



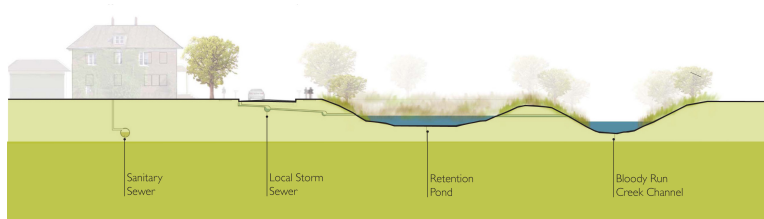
Source : *The Bloody Run Creek Greenway Redevelopment Project : Executive Summary*

le kayak, la course à pied, le vélo, le pique nique, le golf, l'équitation, le jardinage et la voile (figure 37). Des projets similaires, fondés sur la remise à l'état naturel d'un cours d'eau, ont rencontré un franc succès à Vancouver, Yonkers (New York), Seattle, Séoul ou encore Kalamazoo (Michigan). L'expertise dans ce domaine est en cours de consolidation (Gallagher, 2013 [37]).

Conclusion

Le *Detroit Strategic Framework Plan* propose donc un calendrier des changements envisagés dont ses auteurs espèrent être les témoins. À travers une approche en quatre étapes (stabiliser, améliorer, soutenir et transformer), ce document vise à rendre à Detroit son rôle de ville compétitive d'ici à 2050, avec une population stabilisée à environ 1 million d'habitants. Cela lui permettrait d'entrer de nouveau dans la liste des dix villes les plus peuplées des États-Unis.

FIGURE 36 – Projet de *Bloody Run Creek* : concept hydrologique



Source : *The Bloody Run Creek Greenway Redevelopment Project : Executive Summary*

FIGURE 37 – Projet de *Bloody Run Creek*, première phase



Source : *The Bloody Run Creek Greenway Redevelopment Project : Executive Summary*

Au-delà de ces objectifs, le *Detroit Framework* reflète à sa manière une nouvelle manière de travailler le territoire. Il reflète en premier lieu l'idée selon laquelle les réseaux d'infrastructure doivent aujourd'hui afficher une certaine flexibilité et être capables de se faire supports d'une multitude d'usages et de flux - un argument fréquemment relevé dans les travaux scientifiques contemporains (voir notamment Zimmerman, 2009 [109]). La décroissance de la ville sera nécessairement accompagnée d'une décroissance de ses ré-

seaux. Mais les infrastructures nouvelles ou transformées permettront une autre croissance : celle des fonctions et des usages. Les manières dont du foncier vacant peut être réaffecté pour la construction d'une infrastructure paysagère a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques. Schilling et Logan (2008 [96]) ont notamment affirmé que c'est d'une nouvelle « vision » dont les anciennes villes industrielles ont aujourd'hui besoin. Le *Detroit Framework* en est une.

Rappelons enfin les propos de Hospers (2013 [48]) pour qui c'est à travers la gouvernance que l'avenir des villes rétrécissantes peut être traitée, plutôt que par des mesures qui viseraient exclusivement la croissance (économique), ajoutant qu'un large éventail d'acteurs doit être impliqué dans le processus à l'échelle régionale : les gouvernements locaux seront d'après lui de plus en plus dépendants des populations pour la mise en œuvre de leur action. Le *Detroit Framework* est un bon exemple d'une telle approche, fondée sur l'implication d'un très large éventail d'acteurs. Comme le rappellent Luescher et Shetty (2013 [67]), accompagner la résilience d'une ville rétrécissante n'est pas seulement une question matérielle ou physique : l'équité et la participation font également partie des défis à relever. En d'autres termes, la question à Detroit ne portait peut-être pas seulement sur la croissance ou la décroissance des réseaux et de l'infrastructure physique (*hard infrastructure*), mais également sur la définition d'une vision partagée et de sa mise en œuvre collective à travers une réorganisation des jeux d'acteurs (*soft infrastructure*). Et Detroit, connue pour la résilience de ces habitants, pourrait devenir une ville exemplaire de demain ; elle renaîtrait de ses cendres, comme sa devise le suggère.

Proposition d’approche méthodologique pour l’analyse des Réseaux Formels d’Entrepreneurs

Vincent LEFEBVRE¹⁰

Introduction

Le réseau du dirigeant d’entreprise est l’un des facteurs clés du processus entrepreneurial : il croît, évolue, et décroît en fonction des évolutions de l’entreprise et de son dirigeant. Les travaux se sont multipliés ces vingt dernières années donnant lieu à deux méta-analyses publiées à quatre ans d’intervalle dans le célèbre *Journal of Business Venturing*. Ces méta-analyses permettent de repositionner les futurs travaux de recherche ainsi que les méthodologies à privilégier (Jack, 2010 [55]) et elles identifient les variables modératrices majeures qui semblent intervenir dans le fonctionnement de ces réseaux (Stam *et al.*, 2014 [101]).

Sarah Jack (*ibid.*) dans sa méta-analyse des travaux sur le réseau de l’entrepreneur identifie différentes pistes pour les futurs travaux de recherche portant sur le sujet. Parmi ces pistes, on retiendra les principales : prendre en compte la temporalité des réseaux et combiner les approches quantitatives et qualitatives. Elle signale également que les études existantes adoptent une approche égocentrée. En d’autres termes, on étudie le réseau de l’entrepreneur comme la résultante de l’agentivité d’un individu engagé dans un processus entrepreneurial, et beaucoup moins le fonctionnement des réseaux comme des entités à part entière, avec leurs frontières, leurs spécificités, leurs objectifs, leurs interactions, leurs discours, leurs pratiques, et leurs impacts sur les membres et leurs entreprises.

Stam *et al.* proposent une autre méta-analyse, également publiée en 2014 [101], qui fait état des liens entre capital social et performance des petites entreprises. Ils introduisent trois variables modératrices afin d’étudier les différents travaux produits sur ce thème : l’âge de l’entreprise (jeune/ancienne), la nature du secteur (*high* ou *low technologies*) et la nature de l’économie du pays dans lequel l’entreprise est établie (émergente ou développée).

Deux autres constats apparaissent au travers de ces méta-analyses sans être pour autant abordés explicitement. Premièrement les travaux sur le réseau et le capital social des entrepreneurs ou des petites entreprises traitent principalement du réseau propre au dirigeant et à son entreprise (Jack, *ibid.*), les réseaux formels d’entrepreneurs (qui ont une structure d’animation et sont

10. ISC Paris Business School (jusqu’en septembre 2014), AUDENCIA Nantes (à partir de septembre 2014)

ancrés territorialement) sont très peu étudiés, que ce soit dans leur fonctionnement ou dans leur évolution. D'autre part, il faut également relever que les travaux étudiés prennent peu en compte l'ensemble des dimensions entrepreneuriales (opportunités d'affaires, ressources et émergence organisationnelle) préférant se focaliser sur un aspect ou un autre du processus entrepreneurial. En se positionnant ainsi, les travaux ont tendance à chercher à vérifier quelques hypothèses fondées sur des soubassements théoriques qui n'ont souvent pas été démontrés dans le contexte spécifique étudié (transfert de concepts et de modèles théoriques et méthodologiques du champ de la sociologie des réseaux, par exemple, à celui de l'entrepreneuriat, sans précautions et tests préalables).

Dans ce contexte de recherche où, d'une part, les chercheurs sont invités à travailler en suivant certaines indications méthodologiques tout en prenant en compte des variables modératrices prescrites à l'avance et où, d'autre part, l'appareillage méthodologique à mettre en œuvre semble devenu de plus en plus chronophage (Jack, *ibid.*), quelle approche méthodologique adopter pour étudier les réseaux formels d'entrepreneurs ?

Dans cette communication, nous essaierons tout d'abord de spécifier au mieux ce que l'on entend par « Réseau Formel d'Entrepreneurs » (RFE). Nous tenterons ensuite de prendre en compte l'ensemble des suggestions introduites ces dernières années en matière d'étude du réseau de l'entrepreneur et de son entreprise, en y ajoutant les exigences méthodologiques liées à l'analyse des réseaux sociaux afin de formuler une proposition de cadre d'analyse pour le cas qui nous intéresse : les RFE.

1. Le Réseau Formel d'Entrepreneurs

Les réseaux formels sont des réseaux horizontaux et tactiques qui favorisent la consolidation et le développement des entreprises (Proulx, 1991 [86]). Ces réseaux peuvent avoir une visée de socialisation et permettre à leurs membres « de se rassembler pour affirmer leur identité, se valoriser, se sécuriser ou tout simplement, pour échanger des idées et se divertir » et/ou une visée économique et permettre alors à leurs membres « de connaître et de maîtriser leur environnement économique » (LeBrasseur et Robichaud, 1999, p. 14 [63]). Le réseau formel est davantage défini par sa finalité que par son fonctionnement. Dans cette perspective, le réseau formel d'entrepreneurs est conçu comme un dispositif à enjeux purement économiques dans un contexte d'échange social. Il est d'autant plus efficace que les membres sont fortement connectés et ont des points communs (Parker, 2008 [78]). Cependant, il apparaît que les échanges portent davantage sur les échanges de connaissances

et sur les expériences des membres. Les entrepreneurs partagent ainsi leurs bonnes et mauvaises pratiques (Parker, *op.cit.*). Parker invite la communauté des chercheurs à affiner l'impact de tels réseaux sur le développement des entreprises.

C'est ce que proposent Schoonjans *et al.* dans leur étude longitudinale de 1992 à 2008 d'un réseau PLATO en Belgique (2013 [97]). Ce réseau est un RFE car il est structuré comme un programme animé et subventionné par le gouvernement flamand qui vise à favoriser les échanges d'expériences et de connaissances entre pairs. Cette étude fait apparaître des résultats positifs sur la croissance des entreprises et l'accès à des ressources.

Vincent Lefebvre (2014 [64]) propose une définition du RFE et une triple perspective de lecture de ce dernier :

« Les réseaux formels d'entrepreneurs (RFE) peuvent prendre différentes appellations et fonctionner selon des formes organisationnelles et juridiques variées, mais ils partagent des dynamiques d'accompagnement propres aux communautés de pratique, aux communautés de liens faibles et aux communautés mimétiques. Leurs objectifs sont de répondre aux attentes des membres en termes de développement de compétences, détection d'opportunités, accès à des ressources, et renforcement de la connaissance relative aux marchés. »

Ce travail se réfère avant tout à la structure d'animation et au rôle que le RFE peut jouer en matière d'accompagnement des entrepreneurs et des entreprises membres. Nous allons nous appuyer sur cette triple perspective pour formuler notre proposition d'approche méthodologique des RFE.

La littérature et les travaux menés sur les RFE sont récents et encore peu nombreux. Les travaux sur leur impact mettent en avant un ensemble de bénéfices et de retombées positives pour les individus et les organisations, mais peu de recherches permettent de comprendre leur fonctionnement et leur structure.

2. La littérature entrepreneuriale sur les réseaux

William B. Gartner s'est attaché dans ses travaux de 1990 [38] et 1993 [39] à définir l'entrepreneuriat. Ces travaux récents n'en sont pas moins séminaux. Ils nous présentent les différentes dimensions à prendre en compte lorsque l'on parle d'entrepreneuriat. Il s'agit principalement des opportunités d'affaires, de l'émergence organisationnelles et de la mobilisation de ressources.

Le défi pour les chercheurs souhaitant aborder le sujet de l'entrepreneur et son réseau est donc de choisir la dimension entrepreneuriale sur laquelle va

porter son travail : ressources, opportunité ou organisationnelle et souvent de spécifier à l'intérieur de ces dimensions ce sur quoi va porter l'étude. Sarah Jack (2010 [55]) liste pas moins de 18 familles d'apport dans la littérature entrepreneuriale sur les réseaux.

2.1 Les critiques

Les auteurs s'accordent volontiers à dire que la littérature entrepreneuriale sur les réseaux souffre de nombreuses limites :

- Hoang et Antoncic (2003 [47]) admettent que les théories des réseaux n'ont pas encore été suffisamment opérationnalisées dans le contexte entrepreneurial ;
- Storey (2010 [102]) reconnaît que les définitions ne s'accordent pas et que les résultats relatifs au poids des liens faibles/forts sont divergents ;
- Jack (2010 [55]) pointe de nombreuses limites : les cadrages théoriques divergents, le manque d'uniformité dans les définitions, les implications pratiques impossibles à mettre en application. . .

Au-delà des nombreuses critiques, une volonté générale de clarifier le champ est en marche et cette communication vise à s'inscrire dans cette perspective.

2.2 Les axes à développer

Effectivement, le sentiment qui prédomine à l'immersion dans la littérature entrepreneuriale sur les réseaux est celui de se focaliser sur des impacts avant même de connaître la structure du réseau en question et les processus en jeu dans la démarche réseau de l'entrepreneur.

Nous avons évoqué dans l'introduction les invitations nombreuses à poursuivre le travail de recherche autour des réseaux en entrepreneuriat. Quels axes retenir dans ce champ qui est en pleine introspection et à la recherche d'un ancrage solide pour pouvoir sortir de ses contradictions et ses incohérences ? Pour nous, il y en a trois :

- a) Questionner les soubassements théoriques afin de les opérationnaliser (Hoang et Antoncic, 2003 [47]). En effet, il faut éviter tout dérapage ontologique (Thompson, 2011 [104]) pour conserver une pertinence dans les nouveaux apports réalisés ;
- b) S'éloigner des analyses égocentrées (Jack, 2010) qui corrélient le réseau déclaré par l'entrepreneur et la performance ;
- c) Prendre en compte la dimension temporelle (Jack, 2010).

2.3 Les apports des méta-analyses en termes de méthodologie

Nous avons évoqué en introduction les deux méta-analyses de Sarah Jack et de Stam, Arzlanian et Elfring. Dans ces deux travaux il apparaît que la littérature entrepreneuriale offre un patchwork d’approches méthodologiques, de contextes et de résultats relatifs aux réseaux entrepreneuriaux. Sarah Jack (2010) les articule selon le type d’impact du réseau mesuré dans les différentes études : par exemple, l’internationalisation, l’identification d’opportunités, l’accès à des ressources, etc. Jack identifie également les différentes approches méthodologiques dans ce champ, et nous pouvons constater que les appareillages méthodologiques ne prennent que très peu en compte les outils traditionnels de l’analyse des réseaux sociaux. Là aussi, les travaux portent plutôt sur l’impact que sur le fonctionnement des réseaux entrepreneuriaux.

Stam *et al.* (2014 [101]) essaient de dégager des différents travaux étudiés un consensus sur l’impact du capital social de l’entrepreneur et la performance des petites entreprises. Ils proposent trois variables modératrices qu’ils ont testées au travers de leur travail : l’âge de l’entreprise (jeune ou établie), nature du secteur (*high* ou *low technologies*) et nature de l’économie du pays dans lequel l’entreprise est établie (émergente ou développée).

3. Proposition d’approche méthodologique

3.1 Les enseignements de la littérature

Au regard des différents aspects énoncés dans la littérature, que ce soient les critiques ou les pistes de recherche, les différents points qui sont à intégrer pour adopter une approche méthodologique qui réponde aux différents enjeux sont :

- intégrer les outils traditionnels de l’analyse des réseaux sociaux pour questionner les théories séminales et éviter les dérapages ontologiques ;
- étudier un réseau de la manière la plus exhaustive possible, pour éviter le questionnement déclaratif du réseau égocentré ;
- mesurer les différentes composantes entrepreneuriales : entrepreneur, entreprise et entrepreneur et entreprise sur son marché, pour lever l’ambiguïté sur « l’objet » concerné par le réseau : l’entreprise ou l’entrepreneur ;
- prendre en compte la temporalité, pour mieux appréhender les évolutions du réseau ;
- prendre en compte les variables modératrices : âge de l’entreprise, nature du secteur et nature de l’économie du pays d’implantation.

3.2 L'approche méthodologique

Sarah Jack (2010) évoque le temps comme étant la principale difficulté pour les chercheurs désireux de satisfaire aux exigences nécessaires à la progression des travaux en matière de réseau de l'entrepreneur. En effet, l'exigence d'un mélange d'études quantitatives et qualitatives représente un « coût » temps important pour le chercheur. Cette communication a pour objectif de participer à « l'économie de temps » nécessaire en proposant une approche méthodologique permettant d'étudier les RFE de manière pertinente en satisfaisant aux exigences énoncées.

3.3 Analyser le réseau social d'un RFE : une approche multidimensionnelle

Les RFE sont des réseaux fermés organisés autour d'un dispositif d'animation professionnel ou bénévole, les outils d'analyses nécessaires à la compréhension des liens et des échanges entre membres relèvent donc bien, pour nous, des approches issues de l'étude des réseaux sociaux (Hennig *et al.*, 2012 [44]). Les membres/adhérents ont des objectifs professionnels spécifiques et le RFE doit être perçu comme un outil de socialisation leur permettant d'atteindre ces objectifs. Analyser un RFE dans une perspective entrepreneuriale ne saurait s'appuyer sur la mesure d'une unique force des liens interpersonnels en fonction de l'intensité et la périodicité des relations, même si celle-ci reste le point de départ de l'analyse du réseau afin d'obtenir une représentation des relations interpersonnelles sans contexte spécifique.

Pour bien prendre en compte les différents « éléments circulants » au sein d'un RFE et dans une dimension entrepreneuriale, il va falloir s'intéresser à ce qui touche et l'entreprise et l'entrepreneur. Pour cela, nous estimons que trois types d'échanges doivent être étudiés au sein du RFE, d'une part pour vérifier ce qui circule vraiment au sein du réseau étudié et d'autre part pour couvrir les différentes composantes susceptibles d'impacter l'entrepreneur et son entreprise. Ces trois échanges sont fondés sur :

- les opportunités d'affaires (Shane et Venkataraman, 2000 [98]) ;
- les ressources (Alvarez et Busenitz, 2001 [2]) ;
- les connaissances/les expériences (Cohendet et Llorna, 2010 [20]).

Analyser un réseau fermé en mesurant 3 dimensions d'échanges suppose une collecte de données conséquentes mais néanmoins nécessaire. La tentation pourrait être de questionner le réseau sur son fonctionnement et ses finalités et de ne se focaliser que sur l'apport dominant mais on risquerait de passer à côté d'une dimension tacite non exprimée.

Comment mesurer ces « éléments circulants » du RFE ?

Dans son travail sur un cabinet d'avocats, Emmanuel Lazega (1992 [61]) mesure l'échange de conseil entre les différents membres du cabinet d'avocats en prenant en compte auprès de qui les membres prennent des avis et à qui ils en donnent. Nous pouvons retenir cette approche pour chacune des dimensions retenues. Ainsi :

- pour mesurer la circulation d'opportunités d'affaires dans le réseau fermé que représente le RFE, nous pourrions mesurer la fréquence avec laquelle les entrepreneurs ont échangé des opportunités (des contacts de prospects, des ouvertures sur de nouveaux marchés ou s'ils ont fait appel en tant que client à l'autre membre) ;
- pour mesurer la circulation de ressources (hors conseils, expertise), on se réfère à la fréquence des échanges (matériel, financement, collaborateurs, etc.) ;
- pour mesurer la circulation des connaissances et expériences, on se réfère à la fréquence des échanges d'expertise/conseil permettant d'améliorer la performance en tant que dirigeant.

Nous parlons bien ici d'échange, cela suppose que nous demandons à chaque membre de nous faire connaître à la fois son avis en tant qu'émetteur d'opportunité pour ses pairs mais aussi en tant que récepteur (de qui a-t-il reçu des opportunités ?). Cette double mesure permet de vérifier qu'« émetteur » et « récepteur » sont bien en accord et que la mesure de la fréquence n'a pas été exagérée ou sous-estimée par l'un ou l'autre. On peut ainsi adopter des mesures correctives si besoin. Par exemple, en transposant la matrice d'adjacence de la réception, on obtient la matrice de réception du point de vue de l'émetteur et on peut comparer les résultats deux à deux.

En terme de mesure, cela revient donc à faire évaluer par les membres sept fois le lien et les échanges entre lui et les membres du réseau : une fois la nature des liens, puis deux fois pour les opportunités, deux fois pour les ressources et deux fois pour les conseils et expertises. Ainsi pour un réseau de 50 entrepreneurs, chaque répondant devra mesurer : $(50-1)*7 = 343$ relations. Et le chercheur devra analyser : $343*50 = 17\ 150$ données. La bonne maîtrise des outils d'analyse des réseaux sociaux est à ce niveau indispensable ainsi qu'un RFE engagé dans la démarche où chaque membre accepterait de répondre à autant de questions.

Nous rappelons ici que nous développons une approche méthodologique exhaustive qui vise à l'étude complète d'un RFE. En fonction du cadre d'analyse, le chercheur pourra limiter le nombre de mesures.

Dans notre analyse du RFE, il ne faudra pas oublier de recueillir les éléments nous permettant de satisfaire les variables modératrices récemment identifiées par Stam *et al.* (2014 [101]). *A minima*, nous invitons les chercheurs à recueillir ces données. Mais d'autres caractéristiques des individus et des entreprises qui participent au RFE peuvent apporter des résultats notables.

3.4 Comprendre le processus des échanges : approche qualitative

En fonction de l'axe pris par le chercheur, exhaustif (les 3 dimensions présentées précédemment) ou spécifique (1 ou 2 dimensions), il sera nécessaire de questionner les membres du réseau afin de mieux appréhender les lieux, les contextes, les faits générateurs des échanges.

Il faut prendre en compte que même dans une approche exhaustive, en fonction du poids des échanges, il peut être nécessaire de se focaliser sur une dimension qui apparaîtrait comme dominante au sein du RFE.

Reste au chercheur à déterminer le nombre d'entretiens qu'il souhaite mener. Personnellement, nous recommandons de poursuivre jusqu'à redondance quasi totale de l'information collectée en ayant si possible interviewé des personnes de *clusters* différents.

3.5 Le réseau dans le temps

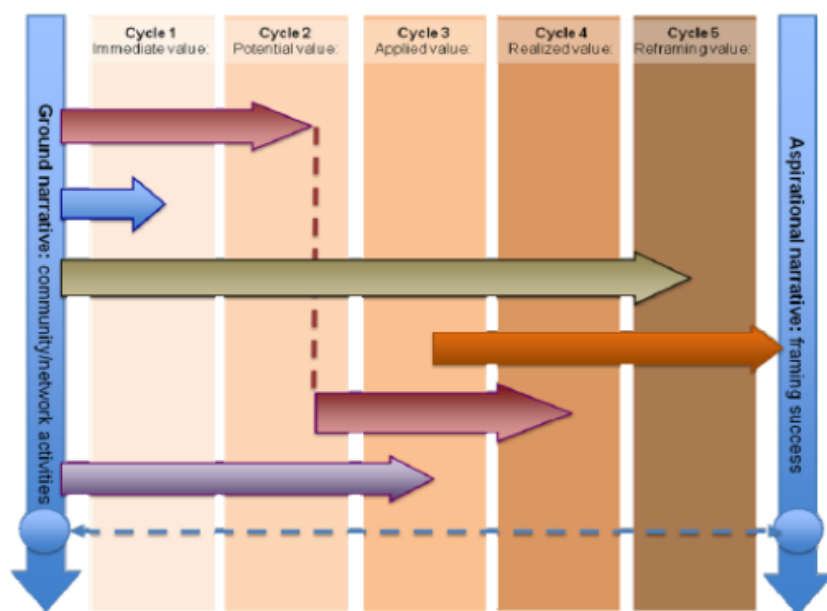
Comprendre le fonctionnement et les impacts des réseaux formels d'entrepreneurs demande souvent aux chercheurs une approche ou une méthodologie de recherche longitudinale. Comment répondre de manière adéquate à cet enjeu supplémentaire ?

Wenger *et al.* (2011 [107]) ont travaillé récemment sur la dimension de la création de valeur au sein des communautés et des réseaux. Les auteurs ont identifié des cycles de création de valeur et ont mis en avant des outils permettant de positionner les réseaux, en fonction de leur stade de développement, dans le cadre de ces cycles. Cette perspective oblige à situer l'étude des RFE dans un modèle de développement identifiant des cycles de création de valeur qui correspondent à un certain degré de maturité du réseau. Ces cycles sont caractérisés, entre autres, par le niveau et la qualité des interactions, la nature des informations échangées, l'acquisition de compétences, la richesse de la mise en relation, le type de relations entre les membres, et l'impact sur les entreprises en matière de changements organisationnels.

Pour étudier les RFE, les approches longitudinales nous semblent ainsi nécessaires pour mettre en évidence l'évolution des réseaux ; néanmoins, des

approches plus limitées dans le temps peuvent aussi s'avérer utiles dans la mesure où l'on est capable de situer le réseau dans l'un des cycles de développement précédemment identifiés par Wenger *et al.* (*ibid.*).

FIGURE 38 – Création de valeur et cycles des réseaux



Source : Wenger, Trayner et De Laat (2011 [107])

D'autres travaux permettent de prendre en considération la temporalité dans les réseaux en positionnant le réseau sur un stade d'évolution. Le second travail que nous allons évoquer ici s'appuie sur l'évolution de la nature de la confiance entre membres en fonction du temps (Smith et Lohrke, 2008 [100]). Selon les auteurs, les membres du réseaux auraient des relations qui évolueraient d'une phase d'échanges dyadiques à enjeux de socialisation vers une phase d'échanges dyadiques à enjeux socioéconomiques, et, enfin, à une phase d'interactions inter organisationnelles où des opportunités, des ressources et des projets commun pourraient émerger.

Cela permet également de prendre en considération l'un des dilemmes des chercheurs sur les réseaux en entrepreneuriat : impactent-ils l'entreprise ou l'individu ? Cette courbe prend plus en considération le temps passé par l'entrepreneur dans le réseau que la maturité du réseau.

FIGURE 39 – Modèle de stades d'évolution de la confiance cognitive et affective au sein de réseaux entrepreneuriaux

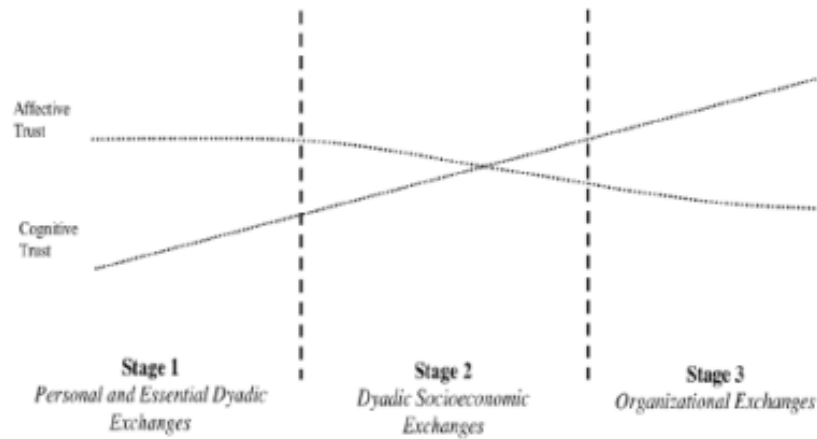


Fig. 1. A stage model of cognitive and affective trust within entrepreneurial venture networks.

Source : Parker (2008 [78])

Au regard de ces deux éléments externes permettant d'inclure une dimension temporelle dans l'étude des RFE, nous préconisons de bien identifier l'année d'adhésion dans le réseau et les personnes initialement connues lors de l'intégration et, d'autre part, de pouvoir échanger avec les animateurs du réseau afin de pouvoir faire une évolution du réseau en suivant la grille d'analyse de Wenger *et al.* (*ibid.*). Cet échange sera complété des commentaires réalisés par les adhérents lors des entretiens semi-directifs.

4. Schéma de la proposition

En synthèse, notre proposition de cadre méthodologique pour l'analyse des réseaux d'entrepreneurs et plus particulièrement les RFE devrait permettre de faciliter les contributions dans ce champ où de nombreuses difficultés ont été identifiées.

En incluant des travaux récents tout en s'inscrivant dans une filiation cohérente avec les cadres conceptuels déjà établis, nous pouvons proposer le cadre de la figure 40.

FIGURE 40 – Proposition d’approche méthodologique des Réseaux Formels d’Entrepreneurs

Nature de l'analyse	Approche méthodologique	Échantillon	Détails	Problème levé	Références bibliographique
Quantitatif	Analyse du réseau social (ARS)	Tendre vers le réseau complet	<ul style="list-style-type: none"> - la nature des liens - les échanges d'opportunités d'affaires, - les échanges de ressources - les échanges de conseils - collecte de données sur les caractéristiques : <ul style="list-style-type: none"> - âge de l'entreprise - secteur - lieu d'implantation - relation antérieure à l'adhésion au RFE - la date d'adhésion 	Prise en compte des dimensions entrepreneuriales Variables modératrices Stade de relations inter-membres	Hennig et al., 2012 Lazega 1991 Gartner 1990 & 1993 Stam, Arzlianian et Elfring (2014) Smith et Lohrke, 2008
Qualitatif	Entretien semi-directif	Autant que de clusters et jusqu'à redondance	En fonction de ce qui est étudié ou ressort dans l'ARS : questionnement sur la nature du processus d'échange et sur les impacts concrets.	Compréhension du processus et de l'impact	Jack (2010) Wenger, Trayner et De Laat (2013)
Qualitatif	Entretien semi-directif individuel ou de groupe	Organes de gestion/animation du RFE	Trame questionnement Wenger, Trayner et De Laat	Prise en compte de la temporalité	Wenger, Trayner et De Laat (2013)

L'appareillage méthodologique pour faire avancer la recherche sur les réseaux d'entrepreneurs est devenu un enjeu clé car d'une part, il doit pouvoir répondre aux exigences scientifiques liées au sujet et d'autre part, il représente un problème pour les chercheurs qui doivent déployer des appareillages « coûteux » en temps à un moment où l'exigence de publications laisse de moins en moins de temps (Jack, 2010). Ce papier a pour objectif de proposer un cadre d'étude permettant de satisfaire aux exigences évoquées et faire ainsi gagner du temps aux chercheurs qui souhaiteraient pouvoir mobiliser un cadre d'analyse adapté à l'étude des Réseaux Formels d'Entrepreneurs.

Ainsi, en s'appuyant sur des travaux récents qui portent sur les phases et évolutions des réseaux, il est possible de prendre en compte les dimensions temporelles d'un réseau sans avoir à déployer une approche longitudinale. Il est également recommandé d'avoir des approches mixtes : qualitatives et quantitatives. L'usage des techniques d'analyse des réseaux sociaux permet d'adopter une approche quantitative tout en étant vigilant et en intégrant les récents travaux ayant identifié les variables modératrices qui font l'unanimité. L'approche qualitative doit de son côté prendre en compte les travaux récents pour identifier les points nécessaires au positionnement temporel du RFE.

Même si la proposition méthodologique présentée ici représente un travail de collecte important, le temps d'analyse et de cadrage devrait être réduit et permettre de multiplier les travaux. Ainsi, une meilleure compréhension du fonctionnement de ces réseaux formels d'entrepreneurs permettrait de mieux appréhender leur finalité : accompagner les dirigeants et leurs entreprises, tant dans une perspective temporelle (cycle du réseau et cycle de l'entrepreneur et de son entreprise) que dans une perspective territoriale.

Les dynamiques d'évolution des réseaux d'électricité européens, des réseaux techniques entre croissance et décroissance

Angélique PALLE¹¹

Introduction

Les évolutions du secteur de l'énergie européen combinées au double objectif de transition et d'intégration énergétique de l'Union européenne (UE) inscrivent les réseaux d'électricité dans une dialectique de croissance / décroissance suivant l'échelle à laquelle on les envisage.

De fortes dynamiques d'évolution affectent le secteur de l'énergie en Europe. L'émergence et le développement des énergies renouvelables, soutenus par les États et l'opinion publique, entraîne une décentralisation de la production d'électricité, les nouveaux sites de production ne correspondant plus aux bassins de consommation classiques. Le caractère intermittent de ces sources d'énergies (principalement solaire et éolien) demande une plus grande flexibilité des réseaux de transport et de distribution d'électricité ainsi que du mix de production pour garantir la sécurité d'approvisionnement.

L'Europe cherche à réduire la croissance de sa consommation énergétique pour des raisons d'impact environnemental ainsi que pour des questions de coût et promeut l'efficacité énergétique, exerçant ainsi une pression sur les réseaux d'énergie pour qu'ils optimisent leur fonctionnement (montée en gamme technologique mais aussi meilleure gestion du réseau et des interactions avec le voisinage).

Ces deux dynamiques de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique ont un impact sur la gestion de la demande qu'il s'agit alors de rendre flexible ce qu'elle est encore très peu aujourd'hui, les évolutions du prix de l'électricité n'ayant que peu d'impact à court terme sur la consommation, notamment des particuliers. Cela demande là aussi une adaptation des réseaux qui devront à terme délivrer non seulement de l'électricité mais également de l'information, circulant dans les deux sens entre le consommateur et le gestionnaire du réseau. Le développement des sources locales d'énergies renouvelables (panneaux solaires sur les toits ou autres dispositifs) fait de certains particuliers des consommateurs-producteurs, l'énergie circulant alors dans les deux sens ce qui demande là aussi une adaptation du réseau.

11. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Le système d’approvisionnement électrique évolue alors vers un réseau plus décentralisé et plus interactif, intégrant l’usage des NTIC qui le rendent plus communicant et flexible mais posent également des questions de vulnérabilité (augmentation du nombre d’acteurs pouvant interagir avec le réseau mais aussi malveillance).

Dans ce contexte général d’évolution interviennent également les orientations politiques prises par l’Union européenne qui poursuit un double objectif de transition et d’intégration énergétique.

L’Union européenne s’est dotée avec le traité de Lisbonne, entré en vigueur le 1^{er} décembre 2009, des cadres juridiques permettant de développer une politique de l’énergie européenne. L’énergie est devenue une compétence partagée entre les institutions européennes et les États, qui conservent cependant la souveraineté sur la composition de leur mix énergétique. La politique énergétique de l’Union s’articule aujourd’hui autour de trois piliers : sécurité d’approvisionnement, durabilité et compétitivité que doivent permettre d’atteindre une transition énergétique réussie et une intégration énergétique européenne. La transition énergétique se veut une évolution vers un système plus durable, moins consommateur et diminuant à terme la dépendance énergétique de l’UE vis-à-vis de ses voisins. L’intégration de l’espace européen en un grand marché commun a pour objectif de permettre des complémentarités de mix (solaire au sud, éolien en Mer du Nord et le long des côtes, sources hydrauliques au nord et dans les Alpes, etc.), des économies d’échelle et de faire jouer la concurrence entre sources d’énergies pour une pression à la baisse sur les prix.

Ces orientations politiques prises par l’UE affectent les réseaux puisque l’intégration énergétique européenne implique une interconnexion des réseaux de distribution d’énergie des pays membres, conçus jusqu’à présent selon des logiques essentiellement nationales.

Les réseaux d’énergie européens et particulièrement les réseaux d’électricité comptent parmi les premiers éléments affectés par les grandes évolutions du secteur de l’énergie en Europe, mais il s’agit d’un aspect peu évoqué de ces dynamiques de transition et d’intégration. Comment envisager alors leur impact sur les réseaux d’énergie qui constituent l’un des supports de ces dynamiques ? Impliquent-elles une croissance ou une décroissance de ces réseaux ? Comment modéliser leur évolution ? Les réponses sont complexes parce que la croissance ou la décroissance des réseaux électriques dépendent notamment de l’échelle d’analyse. Les réseaux d’électricité sont des infrastructures « lourdes » d’un point de vue financier et temporel ce qui rend le réseau stationnaire avec des évolutions sur le long terme et une forte iner-

tie alors même que leur mode de gestion et leur fonctionnement s'orientent aujourd'hui vers plus de flexibilité et de dynamisme.

1. À l'échelle européenne, une densification du réseau

Envisagés à l'échelle européenne, les réseaux d'électricité des différents pays membres sont dans une dynamique de croissance.

L'intégration de l'espace énergétique européen sous l'impulsion du Commissariat à l'énergie de la Commission européenne s'est traduite par plusieurs vagues de législation (1996, 2003, 2006, 2009, 2013¹²) visant notamment à ouvrir les marchés nationaux à la concurrence. Cela ne peut avoir lieu que si le réseau permet techniquement d'échanger entre pays voisins. Pour assurer une cohérence d'ensemble dans les choix d'investissement et les orientations prises pour le futur de ces réseaux, la Commission a demandé à tous les gestionnaires de réseau de transport d'électricité (il en est de même pour le gaz) de s'associer au sein de l'*European Network of Transmission System Operators for Electricity* (Association européenne des gestionnaires de réseau d'électricité). L'ENTSO-E, outre son rôle de plate forme d'échange et d'information, a pour mission principale la rédaction des codes de réseau européens¹³ et du plan d'investissement à dix ans dans les réseaux électriques (*Ten Year Network Development Plan*) au sein duquel la Commission désigne les projets dits « d'intérêt communautaire » qui bénéficient de conditions d'autorisation et de financements avantageux. Le but est de développer les interconnexions entre les différents réseaux nationaux pour créer un maillage électrique européen sans goulots d'étranglement qui doit permettre à terme un couplage des marchés à échelle européenne¹⁴.

Le développement et l'intégration d'un grand réseau européen de transport d'électricité est également soutenu par l'Union européenne dans l'optique d'une complémentarité des espaces et des mix énergétiques. Les potentiels solaires (sud) hydrauliques (nord et Alpes) ou éoliens (côtes et Mer

12. Directive 96/92/CE, 19 déc. 1996, concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité; Directive 2003/54/CE, 26 juin 2003, concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité; Décret n° 1364/2006/CE, 6 sept. 2006, établissant des orientations relatives aux réseaux transeuropéens d'énergie; Directive 2009/72/CE, 13 juill. 2009, concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité; Règlement n° 347/2013, 17 avril 2013, concernant des orientations pour les infrastructures énergétiques transeuropéennes.

13. Ces *network codes* en cours de rédaction doivent assurer une base réglementaire commune pour le fonctionnement des réseaux de transport d'électricité.

14. Le couplage des marchés vise à l'obtention de prix convergents au sein d'un même espace par la fluidification des échanges et l'application des mêmes normes. Il existe aujourd'hui plusieurs initiatives régionales (rassemblant des pays voisins) au sein de l'UE.

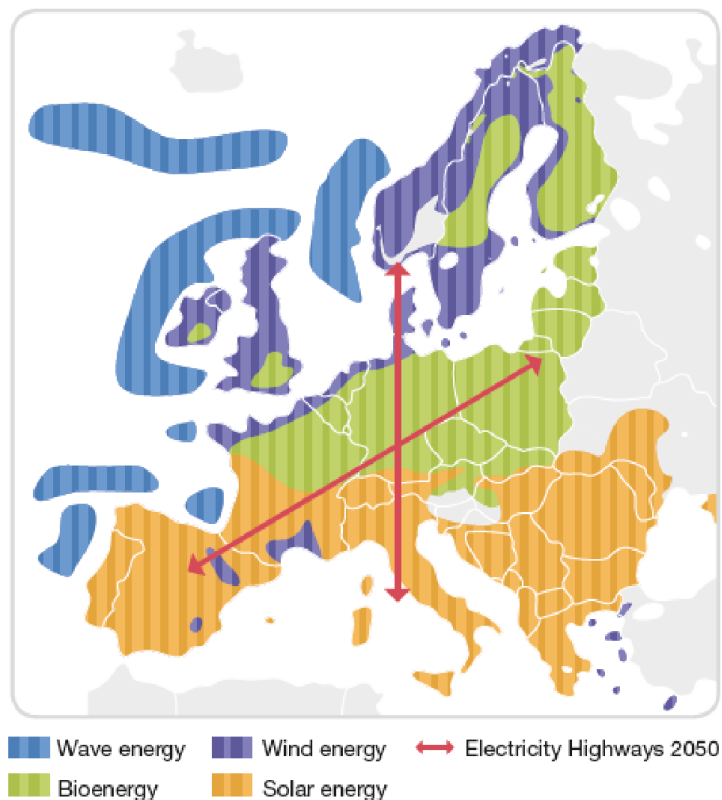
du Nord) des pays membres différent et présentent des complémentarités en termes saisonniers (solaire en été, éolien et hydraulique en hiver). L'UE mais aussi des groupes de pression ou ONG cherchent à les mettre en valeur et les exploiter au travers de projets comme *E-Highway 2050* (figure 41), projet lancé par la Commission européenne et visant à développer une méthodologie pour un planning *top-down* du développement d'un réseau pan-européen de transport d'électricité d'ici 2050, ou de l'initiative *Friends of the Supergrid* qui promeut également la mise en place d'un grand réseau européen de transport de l'électricité (« we need a network not a patchwork », « nous avons besoin d'un réseau pas d'une mosaïque »¹⁵).

Le deuxième support de croissance des réseaux électriques à l'échelle européenne provient des dynamiques de transition énergétique et particulièrement du développement des énergies renouvelables. Les espaces à potentiel de production d'énergie solaire et éolienne (principales énergies non renouvelables en développement actuellement) sont situés en périphérie des bassins de production et de consommation traditionnels, leur raccordement au réseau demande de développer celui-ci ainsi que de le renforcer par endroits pour qu'il puisse supporter le caractère intermittent de la production de ces sources d'énergies renouvelables. L'un des exemples les plus parlants à cet égard est l'initiative des pays riverains de la Mer du Nord. Associés pour développer le potentiel éolien offshore de cet espace, dix pays ont lancé en 2010 le *North Sea Country's Offshore Grid Initiative* (NSCOGI, Initiative de réseau d'électricité offshore des pays de la Mer du Nord) à horizon 2020 afin d'étudier les possibilités technologiques du réseau offshore et la planification du maillage de la zone. Deux options sont possibles : une option radiale relativement *bottom-up* où chaque ferme de production éolienne est reliée au pays riverain correspondant et une option maillée plus flexible et plutôt *top-down* où les fermes sont reliées entre elles, avec une gestion davantage centralisée.

La question de l'adaptation du réseau à la décentralisation des sources de production renouvelables se pose également dans le cas d'un pays comme l'Allemagne qui, après avoir décidé en 2011 l'arrêt de l'utilisation des sources d'énergies nucléaires, se tourne massivement vers le renouvelable sans avoir adapté son réseau de transport d'électricité. La production nucléaire majoritairement concentrée au sud du pays près des bassins de consommation les plus importants doit être compensée notamment par de l'éolien en provenance du nord du pays. Cela implique d'investir rapidement dans de grands

15. Déclaration commune des CEO de *Friends of the Supergrid*, sommet des 25 et 26 février, Edimbourg.

FIGURE 41 – Répartition de la production d'énergies renouvelables en Europe telle qu'envisagée par le projet *e-Highway 2050*



Source : *5th Stakeholder Workshop : Governance structures for the e-Highway2050 scenarios and the e-Highway2050 Strategic and Environmental Sustainability Assessment (SESA)*, May 6th, 2014, at Radisson Blu Royal Hotel in Brussels

corridors de transport nord-sud, apparus dans la liste des projets d'investissements européens dès 2012¹⁶.

Comment modélise-t-on alors l'évolution d'un tel réseau soumis à ce type de contraintes? Les infrastructures électriques sont pérennes, longues et coûteuses à mettre en place (la construction d'une nouvelle ligne de transport

¹⁶. ENTSO-E, *Ten-Year Network Development Plan 2012*, Brussels, 5 juillet 2012. Appendix 1 Table of projects.

d'électricité en France prend en moyenne une dizaine d'années) : le réseau électrique a donc une certaine inertie. La modélisation du réseau et de son évolution est principalement réalisée par les gestionnaires de réseau qui l'utilisent pour construire leurs plans d'investissements. Cette modélisation est effectuée à deux niveaux : au niveau du réseau (*network modelling*), il s'agit alors d'envisager les aspects techniques ; au niveau du marché (*market modelling*) où il s'agit cette fois de déterminer les points de congestion qui ont un impact sur la formation des prix.

Chaque gestionnaire fait le modèle de son réseau par sous-stations qui en constituent les nœuds et en prenant en compte les caractéristiques techniques des lignes. Sur ce système nodal sont injectées les données de génération par source d'énergie et d'injection/soutirage à chacun des nœuds ce qui permet d'obtenir la vision de la répartition des flux et des éléments du réseau les plus faibles ou les plus sous tension. Lors de la modélisation du réseau en tant qu'élément constitutif du marché européen, chaque pays constitue un nœud (un peu plus lorsqu'il s'agit de modèles régionaux) à quelques exceptions près comme l'Italie, le Danemark ou le Luxembourg. On calcule alors pour chacun des nœuds et par type de génération les écoulements de puissance pour chaque heure de l'année. L'interaction de ces deux modèles, physique et de marché, du réseau permet de localiser les besoins en renforcements ou en nouvelles lignes, qui semblent actuellement croissants si l'on raisonne à échelle paneuropéenne (figure 42).

2. À l'échelle locale, des dynamiques de décroissance ?

Les logiques de croissance des réseaux d'électricité semblent paradoxalement s'inverser si l'on envisage les dynamiques d'évolution à l'échelle locale.

L'utilisation croissante des énergies renouvelables ne se traduit pas uniquement par l'exploitation de champs éoliens offshore ou de fermes solaires, le renouvelable a aussi un volant local important qui concerne les particuliers. L'installation de panneaux solaires sur les toits constitue l'un des aspects les plus visibles de cette tendance pour le public. Les particuliers deviennent alors producteurs d'une partie de l'énergie qu'ils consomment, certains parlent de *prosumer* ou producteur-consommateur reprenant l'image proposée par McLuhan et Nevitt¹⁷.

Dans certains cas, une combinaison de sources d'énergies renouvelables et d'infrastructures de stockage d'électricité associées à un réseau local « intelligent » (appareils de mesure, gestion de l'intermittence de la production

17. McLuhan et Nevitt, 1972, *Take Today*, New York, Harcourt Brace Jovanovich. p. 4.

FIGURE 42 – Points de congestion du réseau européen, carte réalisée à partir des modèles du réseau utilisés par les gestionnaires de réseau européens



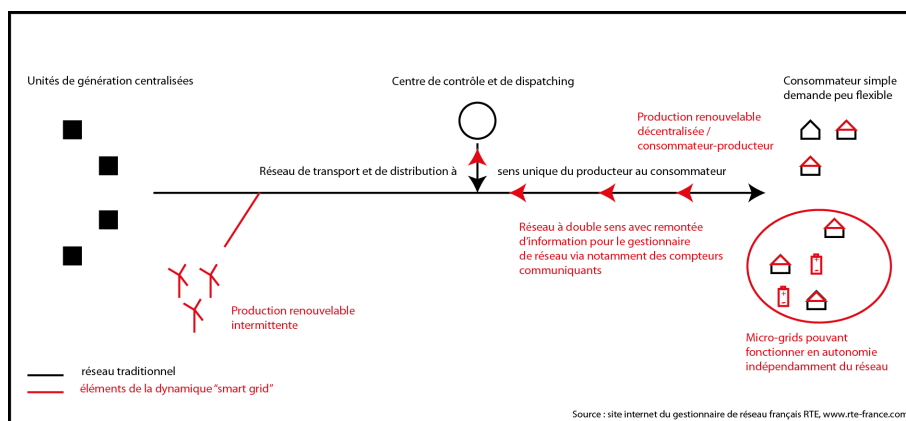
Figure 1.3
100 main bottlenecks in Europe in 2020

Source : ENTSOE, *Ten Years Network Development Plan 2012*

renouvelable équilibrée par les infrastructures de stockage) permettent à des espaces dont l'accessibilité est réduite une indépendance énergétique par rapport au réseau dont le raccordement et la maintenance sont coûteux. C'est le cas notamment pour de petits villages ou habitations situés loin des centres de consommation ou dont l'accessibilité est réduite (par exemple en mon-

tagne) ainsi que des îles. Des projets sont ainsi en cours qui concernent les îles le long des côtes allemandes. Certaines comme l'île de Pellworm (1 200 habitants) sont d'ores et déjà indépendantes vis-à-vis du réseau électrique côtier, grâce à une combinaison de turbines éoliennes, de panneaux photovoltaïques, de centrales au biogaz et d'un système de stockage composé de batteries au Lithium-ion et redox dont une partie est intégrée aux habitations. L'équilibre de l'ensemble est assuré par un système de gestion des flux d'énergie directement intégré au réseau d'électricité. Ces éléments indépendants ou pouvant être déconnectés du réseau sont parfois placés sous le label *micro-grids*, compris comme l'un des éléments de *smart grids* ou réseau intelligents, en cours de développement et d'expérimentation. Le schéma 43 présente les éléments de la construction d'une *smart grid*. En France, la région PACA sert de laboratoire au gestionnaire de réseau français RTE (réseau de transport d'électricité) qui y teste actuellement plusieurs projets : éco-quartier solaire (« Nice-Grid », à Carros) ou *smart grid* à l'échelle d'une commune (projet « premio » dans la commune de Lambesec) géré à distance par une centrale de pilotage.

FIGURE 43 – Éléments de construction d'une *smart grid*



Cette tendance à la prééminence du local comme échelle de référence pour le réseau a le soutien des ONG de défense de l'environnement. Celles-ci souhaitent voir se développer des réseaux plus locaux et plus indépendants les uns des autres, plutôt qu'un grand réseau paneuropéen intégré. Quitte à relier ces réseaux locaux entre eux par la superposition d'un « super réseau » (*super grid*) constitué de câbles HVDC (courant direct à haut voltage) dont

la technologie permettrait par rapport aux lignes en courant alternatif traditionnel une économie significative en termes de nouvelles lignes^{18 19}. Cette éventualité d'un scénario local pour les dynamiques de développement du réseau électrique européen est également envisagée dans d'autres cadres et notamment le projet *e-Highway 2050* qui rassemble un consortium de 28 partenaires, ONG, associations, entreprises, gestionnaires de réseau, universités ou instituts de recherche.

Conclusion

Les réseaux de transport d'électricité européens sont en cours d'adaptation aux évolutions du secteur de l'énergie survenues durant les vingt dernières années. Prise en compte du renouvelable à production intermittente et souvent à l'écart des centres de production traditionnels, intégration européenne nécessitant d'interconnecter les différents réseaux nationaux et de mettre en place des structures de gouvernance et gestion communes et flexibilisation de la demande sont les éléments porteurs de cette transition. Ils tendent à fragiliser des réseaux très centralisés, fonctionnant à sens unique du pourvoyeur vers le consommateur et gérés à échelle nationale.

Le constat de cette vulnérabilité croissante conditionne l'évolution des réseaux d'énergie dont le premier objectif est la sécurité d'approvisionnement, élément stratégique de premier ordre pour le fonctionnement de l'économie. Il s'agit alors d'adapter des infrastructures lourdes en termes de coût de construction, d'empreinte spatiale, ou de longévité et dont l'acceptation par le public est souvent difficile. Si l'infrastructure demeure stationnaire et soumise à une grande inertie, le but est de rendre son fonctionnement plus flexible et dynamique.

L'évolution des réseaux de transport d'électricité suit dans ce contexte une dialectique de croissance / décroissance suivant l'échelle à laquelle on l'aborde ; croissance parce que le raccordement des nouvelles sources de production renouvelables et l'intégration des différents réseaux à l'échelle européenne génère un développement du réseau soutenu par les institutions européennes, décroissance quand à l'échelon local une plus grande flexibilité du réseau et de nouveaux modes de gestion et de production permettent de plaider pour une réduction du nombre de lignes ou à certains espaces de devenir autonomes et indépendants du réseau d'approvisionnement. La

18. Greenpeace, powE[R] 2030, *A european grid for 3/4 renewable electricity by 2030*, rapport 2014.

19. La technologie HVDC n'est cependant pas encore totalement développée pour ce type d'usage et il semble dangereux de la considérer comme une « solution miracle ».

planification du développement du réseau se trouve alors complexifiée par la nécessité d'articuler ces deux échelles et cette double dynamique.

Analyse de la croissance de réseaux de transport sur le moyen terme à partir de sources cartographiques

Olivier BONIN²⁰

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, 1994 [24]).

Les réseaux ont pris une place importante dans le monde d'aujourd'hui, et prennent des formes très différentes : réseaux de communication, réseaux de transport, réseaux d'eau, réseaux d'énergie, réseaux sociaux, etc. Il nous semble utile en préalable de dégager les caractéristiques particulières d'un réseau de transport pour alimenter notre réflexion. 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 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. 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. Certaines caractéristiques de cette croissance peuvent être appréhendées par des indicateurs de la théorie des graphes, locaux ou globaux (Kansky, 1989 [58]). Par exemple, Muraco, dans son étude sur Indianapolis (1972 [73]) 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. Gleyze (2007 [43]) propose une méthode pour faire la part des effets spatiaux et des effets réseaux dans de telles analyses.

20. IFSTTAR - LVMT UMR T 9403

Les apports de la théorie des graphes sont importants pour l'étude de la croissance des réseaux de transport. Cependant, un réseau de transport constitue un type de réseau 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. Il est alors possible de calculer directement la longueur d'une arête en mesurant la longueur de sa représentation spatiale associée, que ce soit sur une carte ou dans une base de données géographique.

Une partie des techniques et indicateurs de la théorie des graphes cherche à mettre à jour des formes dans les réseaux lorsque ceux-ci ne possèdent pas de géométrie naturelle, comme un réseau social ou un réseau d'interactions moléculaires dans une cellule. Ces approches ne seront pas directement pertinentes pour les réseaux de transport. Cependant, 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 [66]). 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 [93]) ou les plans de ville (Barthelemy *et al.*, 2013 [5]).

Un réseau de transport est de nos jours un réseau associé à une infrastructure, et on a souvent tendance à confondre ces deux notions, du fait de l'organisation réticulaire des infrastructures de transport. Certains réseaux de transport sont indissociables de leur infrastructure, comme un réseau ferré ou un téléphérique. D'autres infrastructures, comme la voirie, sont des facteurs de bonne performance d'un système de transport, mais il est possible que le réseau de transport se développe au delà de son infrastructure, par exemple sous la forme d'itinéraires à travers champs. C'est le cas du réseau des circuits de grande randonnée. Nous verrons que cette remarque à première vue anodine prend tout son sens quand on s'intéresse au développement des réseaux de transport sur plusieurs centaines d'années. Par convention, on désigne aujourd'hui par réseau routier l'ensemble de la voirie carrossable destinée principalement à la circulation des véhicules à moteur. Notons que cette définition est beaucoup plus administrative que fonctionnelle. Avec une telle définition, la voirie appartient au domaine public et est sous la responsabilité de collectivités territoriales, ou peut être éventuellement concédée à des entreprises privées (comme certaines autoroutes), ce qui conditionne son entretien ainsi que la possibilité pour la puissance publique d'imposer

des règles, comme le code de la route. La conception de la voirie comme domaine public est relativement contemporaine, et nous devons prendre en compte l'évolution du rapport de la puissance publique à la voirie, et plus généralement aux infrastructures de transport, dans notre analyse de l'évolution des réseaux de transport. Si on transpose cette définition moderne au cas de la France du début du XIX^e siècle, il serait très réducteur de réduire le réseau viaire à la voirie carrossable ; la notion même de carrossable renvoie à une multitude de véhicules aux contraintes très différentes, de la charrette à bras au carrosse tiré par des chevaux. On ne peut donc pas assimiler réseau de transport et infrastructure à toutes les époques.

La question de l'évolution des réseaux pose directement celle de la disponibilité des sources pour une telle analyse. Comme nous l'avons souligné, un réseau de transport n'est pas simplement un ensemble de lieux en relation, mais possède une géométrie, et ses arêtes doivent être évaluées, par exemple par la longueur, la vitesse moyenne observée sur chaque tronçon, ou plus simplement par des caractéristiques physiques comme le nombre de voies de circulation et la largeur des voies. L'omniprésence des données géographiques dans notre monde contemporain nous confronte à l'embarras du choix concernant les sources décrivant les réseaux de transport. À divers fournisseurs étatiques (IGN) ou commerciaux s'ajoutent des projets de saisie collaborative des réseaux viaires (par exemple OpenStreetMap), ainsi que la publication de données agrégées et retravaillées à partir de diverses sources (par exemple Google Maps), ou encore des données harmonisées à l'échelle européenne (ESPON - *European Observation Network, Territorial Development and Cohesion*). Cette multiplicité des sources recouvre de fait des données relativement homogènes dans leur mode de fabrication : dans la plupart des cas, des techniques de photogrammétrie, d'imagerie satellitaire ou de relevés de points par géolocalisation par satellite (GPS) permettent d'obtenir des tracés superposables au terrain, une fois les opérations de projection cartographique effectuées. Les données décrivant des réseaux de transport décrivent leurs infrastructures, qui sont, dans la plupart des cas, des équipements massifs clairement identifiables. Les différences entre les sources de données sont par ailleurs généralement déductibles de l'analyse des spécifications des bases de données. Les spécifications des bases de données décrivant à la fois le contenu de la base, c'est-à-dire les règles de sélection des entités du terrain à représenter, et la manière de représenter géométriquement les objets, il est possible d'expliquer *a priori* des différences de contenu ou de forme des bases de données.

Lorsqu'on s'intéresse aux réseaux historiques, la question des sources se pose avec une acuité toute autre. Un premier type de source consisterait,

comme dans la description d'un réseau social aujourd'hui, à rassembler un ensemble de lieux et un ensemble de relations entre ces lieux à partir de sources historiques, en caractérisant le mieux possible ces relations. Cependant, à l'échelle des communes françaises, il est assez clair que les déplacements d'une commune vers une autre sont possibles depuis fort longtemps, sinon fréquents, en passant naturellement par d'autres communes. La multiplicité des liaisons possibles entre localités rend cette méthode impraticable dans le cas général. Elle ne prend son sens que dans des cas particuliers, comme les récits de voyage, ou la description de grands itinéraires, comme les chemins de Saint-Jacques de Compostelle. Le voyage d'Arthur Young (1792 [108]) fournit ainsi une bonne description des itinéraires et paysages à la fin du XVIII^e siècle en France et en Italie. Ces sources sont lacunaires, car elles ne peuvent couvrir qu'une partie du territoire.

Le deuxième type de source est graphique, et fournit un tracé des infrastructures de transport. Il s'agit des cartes, au nombre relativement restreint si on s'intéresse à un territoire tel que la France. On dispose en France de telles sources historiques conservées à la BNF et à la cartothèque de l'IGN. La première source couvrant l'intégralité du territoire et représentant explicitement le réseau routier principal est la carte de Cassini, publiée entre 1756 et 1815 (Pelletier, 2013 [80]). La deuxième est la carte d'État-Major, réalisée au XIX^e siècle (Huguenin, 1948 [51] ; Dalché 1994 [24]). Enfin, l'IGN a réalisé depuis les années 1940 une nouvelle carte topographique, avant la diversification récente des échelles cartographiques et des bases de données. Les sources cartographiques ne nous renseignant que sur les infrastructures, elles ne décriront que partiellement les réseaux de transport du passé où la mobilité ne dépendait pas tant de la performance intrinsèque du réseau (route pavée ou non, largeur, etc.) que d'autres facteurs, les questions de sécurité sur les chemins, les interdits (propriétés privées), ou encore les redevances, comme l'octroi pour les marchandises.

Le relatif petit nombre des 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 recours à l'analyse quantitative et à la théorie des graphes pour l'analyse et la modélisation de la croissance des réseaux incite à transformer les cartes en données géographiques numériques

similaires aux données produites actuellement. On obtiendrait ainsi une base de données géographique du réseau de transport français à plusieurs dates dans le temps, ouvrant la voie aux analyses longitudinales.

Dans cette optique, la carte de Cassini est en cours de vectorisation par une équipe pluridisciplinaire de chercheurs géographes, historiens, géomaticiens et physiciens²¹. Un travail collectif d'ampleur a permis à cette équipe de disposer à présent d'une première base de données représentant le réseau routier du début du XIX^e tel que décrit par la carte de Cassini. Le réseau de la carte d'État-Major ayant déjà été vectorisé en grande partie, on dispose maintenant des réseaux à deux points dans le temps, en sus des réseaux récents disponibles directement sous forme numérique, pour commencer à aborder la question de la croissance des réseaux de transport, à l'échelle d'un pays tout entier. L'équipe travaille actuellement à la vectorisation des villes, du réseau hydrographique et des diverses limites portées sur la carte de Cassini, de manière à introduire dans la base de données les informations nécessaires à la contextualisation du réseau.

Nous sommes dans le cas favorable d'une carte relativement homogène, aux spécifications connues, et au processus de rédaction bien documenté. Cependant, l'utilisation de sources cartographiques pour constituer des bases de données de réseaux pose des problèmes fondamentaux qui doivent être résolus avant de pouvoir passer à l'étape de conception d'un modèle de croissance proprement dit. Cet article passe en revue les problèmes principaux, et tente de proposer des pistes de résolution, ainsi qu'une réflexion sur la manière de les prendre en compte dans une démarche de modélisation.

Nous commençons par revenir sur les processus de cartographie pratiqués avant l'introduction de la photogrammétrie à la fin du XIX^e siècle. Nous montrons que la cartographie n'est pas une simple opération de décalque et de réduction d'une réalité terrain, mais une opération de modélisation d'un système naturel avec un langage graphique qui est le langage cartographique. Vouloir inférer des évolutions du système naturel entre deux dates différentes à partir des évolutions entre les cartes, donc entre les modèles, nécessite d'analyser à la fois les évolutions du processus de modélisation, soit du rapport du cartographe au monde et aux concepts représentés sur la carte.

Cette question débouche naturellement sur celle de l'évolution de la nature des réseaux de transport, ainsi que des similitudes et différences entre les concepts de réseau, d'infrastructure et de réseau viaire, qui ont eux-mêmes

21. Ce groupe, *geohistoricaldata*, a été fondé et est animé par Maurizio Gribaudi, historien au CRH de l'EHESS, et Julien Perret, géomaticien au laboratoire COGIT de l'IGN.

évolué au cours du temps. La tentation d'analyser un réseau du XVIII^e siècle avec une perspective purement moderne conduirait à des aberrations. Nous évoquons donc dans une deuxième partie les problèmes liés aux évolutions de la nature même des réseaux de transport. À la différence d'une route du XX^e siècle, une route n'est pas toujours un objet simple à appréhender quand on remonte dans le temps. Les routes n'étaient pas nécessairement pavées ni arborées, ni même bien séparées de leur environnement, si bien que leur identification même par leurs contemporains pouvait poser problème. Le tracé des routes pouvait varier au cours du temps ou des saisons, et présenter un manque de stabilité certain lorsqu'il s'agit du réseau secondaire. Elles pouvaient également être interrompues, comme encore aujourd'hui certains cols de montagne lors des périodes hivernales. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la carte de Cassini ne représente que le réseau principal. Un travail historique approfondi est ainsi nécessaire pour comprendre dans quelle mesure l'objet que l'on représente à différentes époques est bien le même, au delà de sa dénomination. On ne peut pas faire non plus abstraction d'évolutions physiques, comme le lit des rivières, qui peuvent induire des modifications du tracé des réseaux (Leteinturier *et al.*, 2000 [65]).

Nous abordons enfin la question de l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la carte. En effet, du fait de son ampleur, la cartographie d'un pays s'étale sur plusieurs dizaines d'années, et est le fruit du travail de très nombreux géomètres et cartographes. Malgré la définition de spécifications, il est difficile de s'assurer que les critères de sélection des routes et voies de communication à représenter, l'appréciation de leur classification, ou encore la manière de les représenter géométriquement sont les mêmes en tout point du territoire. Ce phénomène est particulièrement saillant dans la carte de Cassini qui, de projet royal, a été transformé faute de financement en un ensemble de souscriptions régionales, et reflète donc autant la topographie des lieux que des intérêts politiques des souscripteurs sur leur territoire. Nous esquissons des méthodes d'analyse pour caractériser l'homogénéité des réseaux inter-feuilles et intra-feuilles de la même carte, de manière à pouvoir faire la part entre des spécificités régionales et des modes de représentation cartographique ainsi que les différences de spécifications de contenu.

Enfin, nous posons pour conclure la question de la possibilité d'utiliser des techniques d'analyse spatiale moderne sur un objet anachronique telle qu'une base de données géographique obtenue par vectorisation d'une carte comme celle de Cassini. L'analyse spatiale moderne repose sur la possibilité de mesurer des longueurs, des angles, ou encore des alignements. Avant les techniques de photographie aérienne et de photogrammétrie, la précision géométrique des levés terrains était sans doute bien inférieure à celle des

cartes modernes, et les indicateurs de réseau portant sur la métrique seront impactés par ces limitations, voire inutilisables. En revanche, il est possible de déduire une information sémantique de conventions géométriques adoptées par le cartographe : une route représentée comme très rectiligne sera probablement une route importante dans sa fonction, sinon dans son emprise spatiale. Là encore, une analyse comparée des différentes feuilles d'une même carte apporte des informations importantes pour aider à faire la part de la nature du réseau sur le terrain et du geste du cartographe.

1. La carte : un modèle du monde, et non pas une image

Comme nous l'avons montré dans Bonin (2014 [13]), la carte est une relation de modélisation, au sens de l'approche relationnelle de la modélisation de Rosen (1985 [92]) 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 (1978 [79]), 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.

De manière générale, la carte peut être appréhendée sous trois angles. Premièrement, c'est le produit d'une rédaction cartographique à partir d'informations topographiques rassemblées par diverses techniques. Deuxièmement, la carte est un système de signes qui renvoie à des propriétés du monde auquel elle se rapporte ; nous proposons d'analyser cette relation de modélisation à travers une approche relationnelle. Troisièmement, la carte représente un système de savoir et de pouvoir, qui transparaît dans l'approche même qu'a le cartographe de représenter le monde.

La carte est une représentation plane de portions de la surface du globe, voire du globe tout entier dans le cas de planisphères. Il est donc nécessaire de passer de coordonnées tridimensionnelles à la surface de la Terre à des coordonnées cartographiques planes. Cette opération est une projection et diffère qualitativement de l'opération de perspective attachée à la vision humaine et employée notamment en peinture, ou partie intégrante de l'approche photographique. Ptolémée faisait une distinction entre la chorographie, qui était une description du monde par région, et la géographie,

qui était une description globale de la Terre, s'appuyant sur la projection, le calcul, et l'analyse de quantités. La cartographie s'appuie en effet sur le travail du géodésien, qui porte sur la mesure de la forme de la Terre, et du topographe, qui prend des mesures locales sur le terrain et les rapporte dans le système de projection pour trouver leurs positions analogues dans le plan de la carte. Ainsi, avant l'utilisation de vues aériennes ou satellitaires du terrain, la cartographie était-elle la reconstruction, en chambre, d'une représentation symbolique du monde à partir d'un ensemble de mesures, levés topographiques, minutes, collectés par les topographes sur le terrain. Réaliser une carte ne consiste donc pas à appliquer un calque géant sur le terrain et à reporter sur ce calque le tracé de certains éléments, avant une réduction pour passer de l'échelle du terrain à l'échelle de la carte, mais à reconstruire cette représentation face à une feuille blanche, à partir d'un ensemble de mesures et de relevés disparates. La carte étant ainsi un modèle du monde, et non une simple image mise à l'échelle.

La carte est un ensemble de signes un peu particulier car certains de ses figurés tirent leur sens à la fois d'une représentation symbolique, décrite dans la légende, et de l'extension spatiale de ces figurés opérée lors de la rédaction cartographique. Ainsi, un symbole représentant un clocher ou un moulin sera-t-il simplement positionné sur la carte, tandis qu'un figuré représentant une route sera constitué de l'étirement dans une dimension d'un symbole élémentaire (par exemple un trait de largeur fixe et de couleur donnée). Enfin, certains figurés seront étirés dans les deux dimensions de la carte, comme par exemple un figuré surfacique figurant une pièce d'eau. Le sens véhiculé par la carte est autant dans l'analyse des figurés pris isolément que dans l'analyse des relations entre les figurés. On analyse sur une carte qu'une route dessert une ville si le figuré linéaire représentant cette route arrive dans le voisinage ou au contact du figuré ponctuel ou surfacique décrivant la ville. On est donc capable de lire une carte, et d'en déduire du sens, c'est-à-dire des propriétés concernant les objets du terrain qu'elle représente, sans recourir à des opérations de mesure. Nous insistons sur ce point car transformer la carte en base de données géographique induira nécessairement l'analyste à utiliser des méthodes d'analyse quantitatives (mesures de longueurs, d'angles, de sinuosité, etc.) qui ne sont pas, tout du moins pour les cartes antérieures à la photogrammétrie, nécessairement légitimes. La carte n'est pas un plan, sur lequel l'architecte prend ses mesures pour la réalisation d'un bâtiment. Elle peut répondre à différents objectifs, c'est en ce sens que nous soulignons qu'elle est un instrument de savoir et de pouvoir. Dans le cas de la carte de Cassini, la technique de levé à la planchette utilisée ne permet pas d'assurer systématiquement une représentation des routes dans leur géométrie, avec

l'ensemble des virages. Ainsi, un figuré rectiligne sur la carte pourra traduire un levé simplifié aussi bien qu'une route réellement droite.

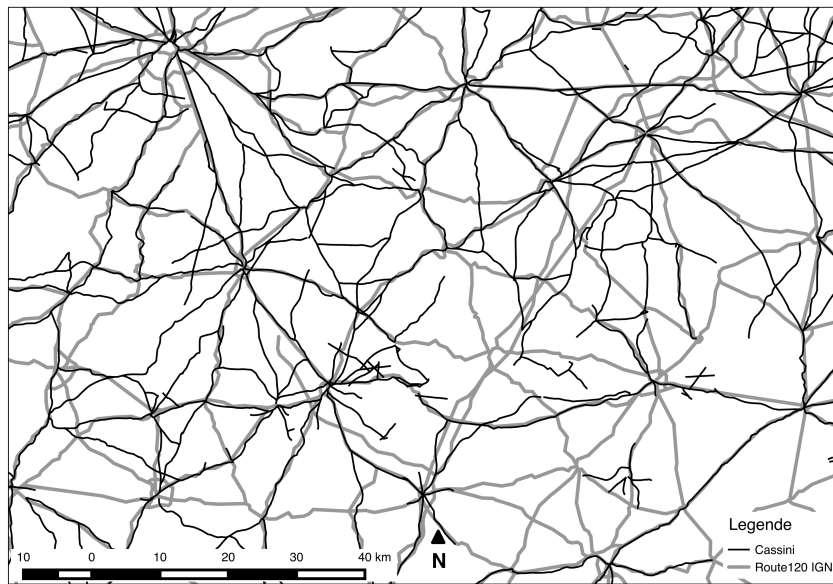
Historiquement, les fonctions de la carte sont nombreuses. Nous relevons toutefois des objectifs récurrents. La carte est un outil scientifique de connaissance du monde, en produisant des représentations symboliques de territoires pour les personnes qui n'ont pas la possibilité de les parcourir physiquement, comme le note Pérec (« parcourir le monde, le sillonner en tous sens, ce ne sera jamais qu'en connaître quelques ares », Pérec, 1974 [82]). La carte peut être un outil remplissant des fonctions utilitaires de description d'itinéraires, de routes commerciales maritimes et terrestres. Elle est aussi souvent un outil régalien, servant à cartographier des possessions, ainsi qu'un outil permettant de réguler la propriété privée, comme le cadastre.

La carte de Cassini, commencée sous Louis XV, regroupe nombre des fonctions que nous venons de citer. C'est tout d'abord une grande innovation technique car cette carte s'appuie sur un réseau géodésique de la France calculé par une triangulation d'une grande qualité, si bien que la 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, établies 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 44).

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 ». Nous sommes donc face à une carte qui combine des objectifs de savoir et de pouvoir, et c'est une des cartes à ne pas avoir été établie uniquement avec des objectifs militaires en tête. 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 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 de la fin du XVIII^e et du début du XIX^e siècle, mais dont la grande précision du positionnement des objets ne 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

FIGURE 44 – Superposition de la base de données Route 120 de l’IGN (gris) et de la carte de Cassini numérisée (noir)



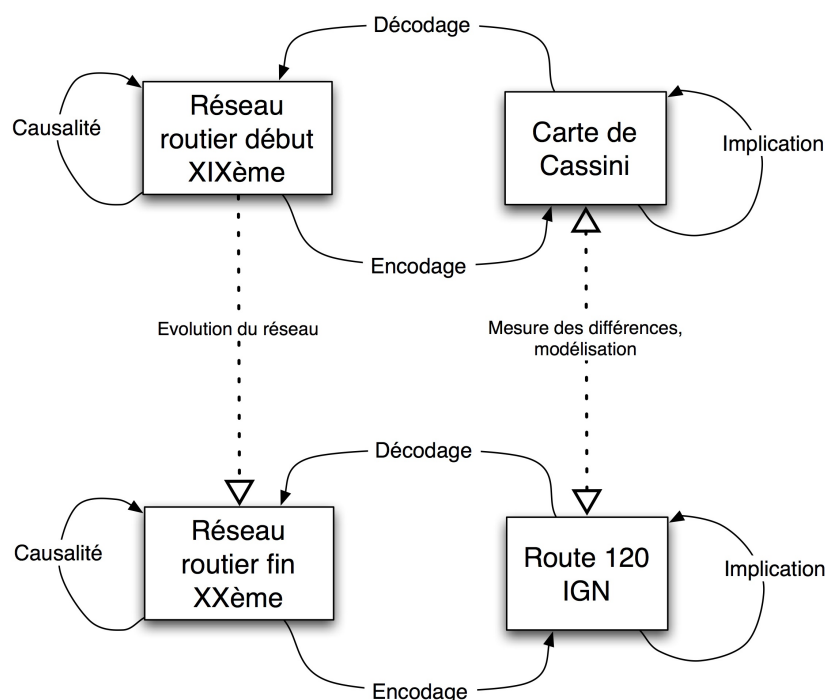
La carte de Cassini présente globalement un moindre niveau de détail sur cet extrait, mais se superpose très correctement à la base de données moderne.

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.

Nous proposons donc d’étendre l’approche de Rosen (1985 [92]) de la modélisation pour formaliser les opérations nécessaires pour reconstruire des évolutions des réseaux de transport à partir d’analyse de différences entre cartes (figure 45).

À chacune des dates, cartographier une partie du territoire consiste à établir une relation de modélisation entre le système naturel considéré, dans notre cas le réseau routier, et la carte proprement dite, par des opérations d’encodage et de décodage. Ainsi, si l’on souhaite représenter une route principale empierrée bordée d’arbres dans la carte de Cassini, l’encodage de cette route dans la carte prend la forme d’une ligne ocre bordée de part et d’autre de symboles figurant les arbres ; à l’inverse, la présence d’un trait ocre poin-

FIGURE 45 – Analyse de la carte comme un modèle relationnel et mise en correspondance de la carte de Cassini et de la base de données Route 120 de l'IGN



tillé sur la carte se décodera comme la présence sur le terrain d'une route en construction. Ces relations d'encodage et de décodage permettent d'effectuer des inférences, en transformant des causalités sur le terrain en implications sur la carte, et réciproquement : un figuré de route rejoignant un symbole de ville sur la carte indiquera une déserte de la ville par la route sur le terrain.

L'objectif est dans notre cas de pouvoir déduire, à travers l'analyse comparative des cartes, c'est-à-dire des modèles, une information sur l'évolution des systèmes naturels que ces modèles décrivent. Si les relations de modélisation n'ont pas évolué au cours du temps, un tel passage du modèle au terrain se fera très naturellement. Cependant, la nature qualitative de la carte pose la question du mode de sélection des entités à représenter, ainsi que de la manière de les représenter. Si, à réseau viaire inchangé, on décide de faire

figurer sur une prochaine édition d'une carte le réseau secondaire et non plus uniquement le réseau principal, la comparaison des cartes laissera penser à un développement du réseau alors qu'il n'en est rien.

Nous commençons par poser quelques réflexions sur la notion même de réseau de transport entre le début du XIX^e siècle et la fin du XX^e siècle avant de rentrer plus en détail dans les questions d'hétérogénéité spatiale et temporelle des données.

2. Réseau, infrastructure, voirie : quels concepts pour la carte de Cassini ?

La difficulté principale à laquelle on est confrontée 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. Nous avons mentionné les liens étroits entre les notions de réseau de transport, d'infrastructure, et d'itinéraire ou chemin. 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. 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 cheminements 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 de l'insécurité des chemins. Nous avons déjà mentionné l'existence des chemins de pèlerinage fonctionnant suivant ce principe. 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. La carte matérialisait 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.

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. À 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 quelles 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 as-

surée 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.

3. Hétérogénéité spatiale et temporelle

S'intéresser à des questions d'évolution de réseaux à partir de sources cartographiques soulève également 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.

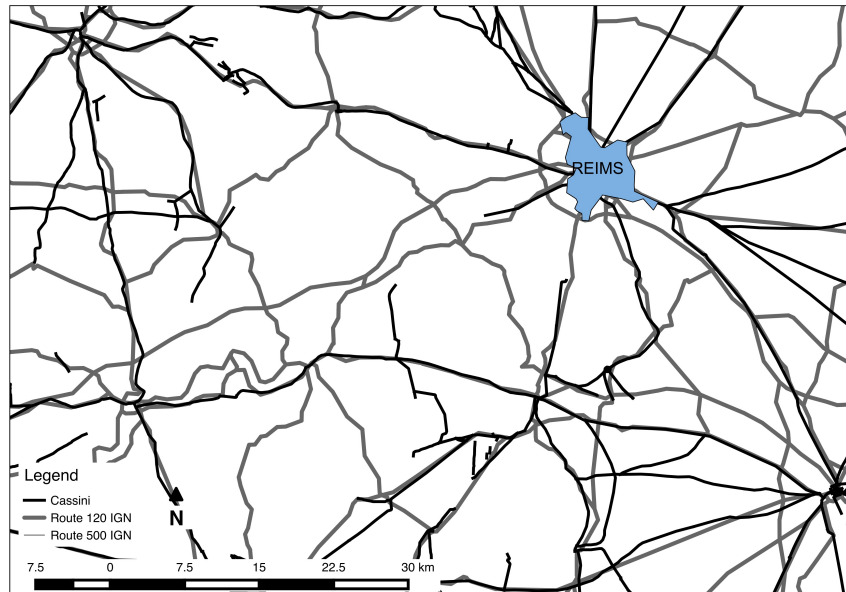
La carte de la Cassini présente des levés terrain s'échelonnant entre 1751 et 1785, pour une publication jusqu'à 1815, dans un contexte de fort développement du réseau routier, comme nous l'avons noté. Elle est découpée en 184 feuilles, ce qui nécessairement implique le concours d'un grand nombre d'ingénieurs 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 46) présente un niveau de densité de réseau routier tout fait anormale par comparaison avec le reste du territoire, bien qu'on puisse se demander si les spécificités de ce territoire, couvert par la forêt et donc nécessitant un réseau de transport pour l'exploitation de cette forêt, ne peut pas expliquer en partie cette particularité régionale.

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 le territoire en question.

À l'inverse, certaines cartes semblent extrêmement peu dotées en routes, laissant sans connexion des localités importantes représentées par un simple

FIGURE 47 – Tardenois et Montagne de Reims

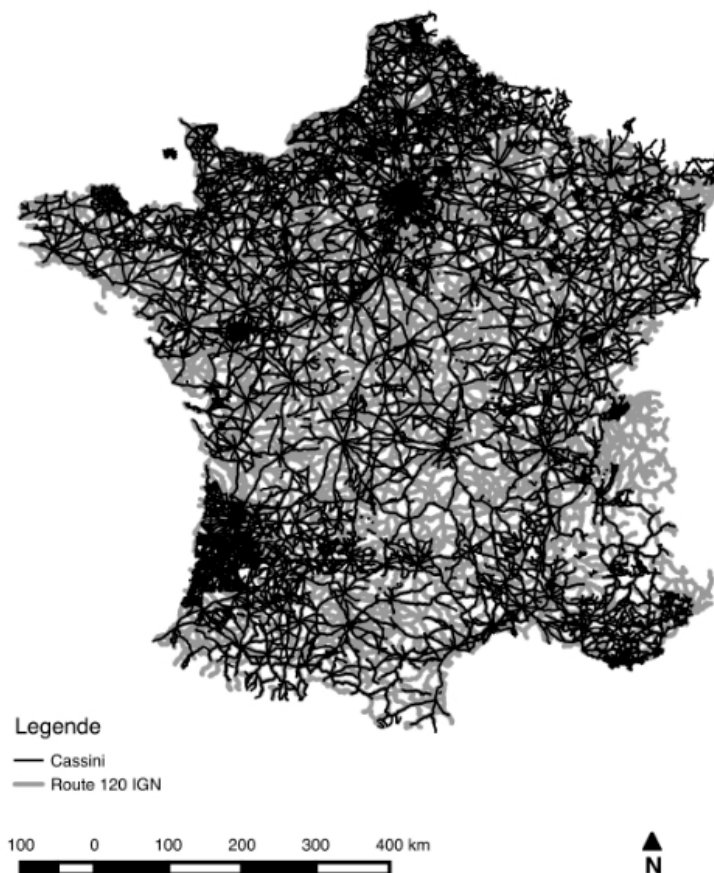


L'application stricte du critère de route principale a conduit les cartographes à ne pas en saisir dans le Tardenois et dans la Montagne de Reims (au SO et au S de Reims), produisant une déconnexion importante du réseau, dans une zone par ailleurs riche en localités.

la 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.

Il est naturellement 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. En revanche, la détection de ces facteurs est un préalable important à l'utilisation de méthodes d'analyse spatiale sur ces données historiques.

FIGURE 48 – Superposition de la carte de Cassini et de Route 120



On perçoit l'hétérogénéité de la densité du réseau de Cassini comparée 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^e siècle.

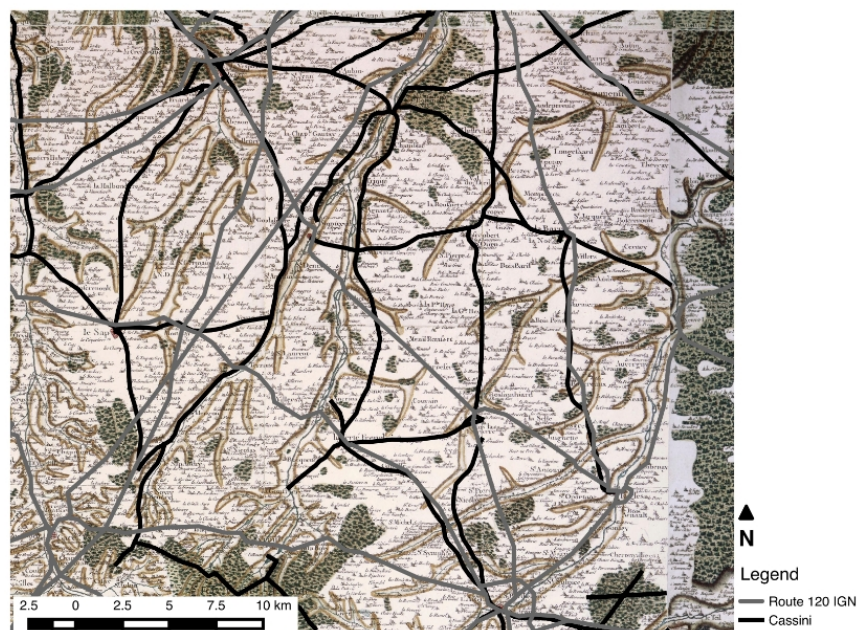
4. Analyse spatiale sur des données historiques

L'analyse spatiale sur des données historiques constituées à partir de sources cartographiques présente de nombreuses limites, que nous avons déjà

évoquées. Les processus de levé topographique produisent des données de géométrie souvent insuffisantes pour calculer avec précision des longueurs, des angles et des alignements.

En revanche, des analyses locales 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 49 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.

FIGURE 49 – 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 49, 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 apparaît 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 entre 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 déduite des toponymes et reconstruite à partir de la forme des objets peut aider à nourrir l'analyse. La figure 50 montre une route parfaitement rectiligne, nommée « chemin de Reims à Charleville », ce qui laisse supposer une liaison importante et structurante, qui a disparu au cours du temps. La détection de ce type d'événement structurant peut facilement être automatisée à l'aide de méthode d'analyse spatiale.

Conclusion

L'étude de la croissance ou de la décroissance des réseaux de transport peut se faire de manière efficace à partir de bases de données géographiques, en mobilisant des méthodes d'analyse spatiale et de théorie des graphes. 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 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

FIGURE 50 – 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 vers le NNE, n'est présent ni dans Route 120 ni dans Route 500. Il a disparu malgré son caractère rectiligne et son toponyme évoquant un rôle structurant.

le temps, comme l'hydrographie et le relief, pour commencer à poser les bases d'une modélisation.

Bibliographie

- [1] R. ALLAIN : *Morphologie Urbaine, Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin, Paris, 2010.
- [2] S.A. ALVAREZ et L.W. BUSENITZ : The entrepreneurship of resource-based theory. *Journal of Management*, 27(6):755–775, 2001.
- [3] J. ANDERSON : Rightsizing government : the Literature and the Detroit Experience. *State and Local Government Review*, 43(3):224–232, 2011.
- [4] J.R. BAREN, éditeur. *Infrastructure : Rebuilding, Repairing and Restructuring*. Nova Science Publishers, New York, 2009.
- [5] M. BARTHELEMY, P. BORDIN, H. BERESTYCKI et M. GRIBAUDI : Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific Reports* 3, (2153), 2013.
- [6] J.F. BAUMAN : The Expressway Motorists Loved to Hate : Philadelphia and the First Era of Postwar Highway Planning, 1943-1956. *The Pennsylvania Magazine of History and Biography*, 115(4):503–533, 1991.
- [7] J.J. BAVOUX, F. BEAUCIRE, L. CHAPELON et P. ZEMBRI : *Géographie des transports*. Armand Colin, Paris, 2005.
- [8] F. BEAUCIRE : *Un siècle de banlieue parisienne : 1859-1964*, chapitre Les transports collectifs devant l’extension des banlieues et l’essor de la mobilité citadine, pages 81–99. L’Harmattan, Paris, 1988.
- [9] C. BERGE : *Théorie des graphes et ses applications*. Dunod, Paris, 1963.
- [10] M. BERGER : La division sociale des espaces périurbains : état de la question. *Strates*, 1:25–33, 1986.
- [11] A. BÉZIAT, J. GOLDBERG, A. HEITZ et F. LAROSE : Les différentiels sociaux de desserte et d’accessibilité : une étude du réseau ferré en Île-de-France. Mémoire de D.E.A., Université Paris I, 2012.

- [12] R. BILES : Expressways before the Interstates : The Case of Detroit, 1945-1956. *Journal of Urban History*, 2014.
- [13] O. BONIN : La carte, modèle analogique et calcul spatial. *Communication & Langage*, 180:47-61, 2014.
- [14] P. BONNIN et S. DOUADY : Analyse et modélisation de la morphogénèse du réseau des rues. In L. BEAUGUITTE, éditeur : *Les réseaux dans le temps et dans l'espace*, pages 47-73, 2013.
- [15] A. BRETAGNOLLE, T. GIRAUD et N. VERDIER : Modéliser l'efficacité d'un réseau, le cas de la poste aux chevaux dans la France pré-industrielle (1632-1833). *L'Espace géographique*, 39(2):117-131, 2010.
- [16] J. BROWN : A Tale of Two Visions : Harland Bartholomew, Robert Moses and the Development of the American Freeway. *Journal of Planning History*, 4(1):3-32, 2005.
- [17] R.G. BUSACKER et T.L. SAATY : *Finite graphs and networks*. McGraw-Hill, New York, 1965.
- [18] Detroit Collaborative Design CENTER : The Bloody Run Creek Greenway Redevelopment Project. Executive Summary, 2011.
- [19] A. CLERVAL : Les dynamiques spatiales de la gentrification à Paris, une carte de synthèse. *Cybergeo*, 2010. <http://cybergeo.revues.org/23231>.
- [20] P. COHENDET et P. LLERENA : *Knowledge-intensive entrepreneurship and innovation systems : evidence from Europe*, chapitre The Knowledge-Based Entrepreneur : The Need for a Relevant Theory of the Firm, page 31. Routledge, Londres et New York, 2010.
- [21] Detroit Works Project Long-Term Steering COMMITTEE : Detroit Future City : 2012 Detroit Strategic Framework Plan. Detroit, Inland Press, 2013.
- [22] R. A. CONROY DALTON : The secret is to follow your nose. *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium*, 47, 2001.
- [23] T. COURTAT, C. GLOAGUEN et S. DOUADY : Mathematics and morphogenesis of cities : A geometrical approach. *Physical Review E*, 83, 2011.
- [24] P.G. DALCHÉ : La représentation de l'espace. De Jean de Mandeville à la carte de l'État-Major. *Revue de synthèse*, 115(1-2):199-206, 1994.
- [25] Région Île de FRANCE : Schéma Directeur Régional d'Île-de-France. publié le 28 décembre 2013 au Journal officiel, 2013.

- [26] X. DESJARDINS, A. BÉZIAT, J. GOLDBERG, F. LAROSE et M. DREVELLE : Les accessibilités à l'emploi par le chemin de fer en Île-de-France depuis 1975. Vers une réduction des disparités sociales? Compte-rendu du colloque de l'association d'Histoire des Chemins de Fer de novembre 2012, 2013.
- [27] X. DESJARDINS, N. DOUAY et V. GAGNIERE : Les mises en scène de la planification de la région parisienne à l'épreuve de la permanence des projets de transport ferré. *Géocarrefour*, 87(2):209–224, 2012.
- [28] J.F.C. DI MENTO : Stent (or Dagger?) in the Heart of Town : Urban Freeway in Syracuse, 1944-1967. *Journal of Planning History*, 8(2): 133–161, 2009.
- [29] Préfecture d'Île-de FRANCE : Schéma directeur. Direction régionale de l'Équipement, 1994.
- [30] C. DUCRUET : Les mesures locales d'un réseau. Working paper du groupe fmr (flux, matrices, réseaux), 2010.
- [31] G.F. DUMONT, éditeur. *La France en villes*. CNED/SEDES, Paris, 2010.
- [32] A. EHRENHALT : *The Great Inversion and the Future of the American City*. Alfred A. Knopf, New York, 2012.
- [33] P. EISINGER : Is Detroit Dead? *Journal of Urban Affairs*, 36(1):1–12, 2013.
- [34] J.-C. FOLTÊTE, C. GENRE-GRANDPIERRE, H. HOUOT et M. FLITTI : Structures urbaines, offres de transport et comportement de mobilité. Rapport de recherche ACI Ville 99V358, 2002.
- [35] L. FROST : The History of American Cities and Suburbs : An Outsider's View. *Journal of Urban History*, 27(3):276–362, 2001.
- [36] J. GALLAGHER : *Reimagining Detroit : Opportunities for Redefining and American City*. Wayne State University Press, Detroit, 2010.
- [37] J. GALLAGHER : *Revolution Detroit : Strategies for an Urban Reinvention*. Wayne State University Press, Detroit, 2013.
- [38] W.B. GARTNER : What are we talking about when we talk about entrepreneurship? . *Journal of Business Venturing*, 5(1):15–28, 1990.
- [39] W.B. GARTNER : Words lead to deeds : Towards an organizational emergence vocabulary. *Journal of Business Venturing*, 8(3):231–239, 1993.

- [40] C. GENRE-GRANDPIERRE : *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 2000.
- [41] C. GENRE-GRANDPIERRE : La structure topologique et fonctionnelle des réseaux routiers urbains comme déterminant de la géographie des flux de déplacements. *In Actes du colloque Géopoint*, pages 61–67, 2001.
- [42] C. GENRE-GRANDPIERRE et J.-C. FOLTÊTE : Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. *Cybergeo*, 248, 2003.
- [43] J.F. GLEYZE : Effets spatiaux et effets réseau dans l'évaluation d'indicateurs sur les nœuds d'un réseau d'infrastructure. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2007. document 370, mis en ligne le 15 avril 2007.
- [44] M. HENNIG, U. BRANDES, J. PFEFFER et I. MERGEL : *Studying social networks : A guide to empirical research*. Campus Verlag, 2013.
- [45] B. HILLIER et J. HANSON : *The social logic of space*. Cambridge University Press, Cambridge, 1984.
- [46] B. HILLIER, A. PENN, J. HANSON, T. GRAJEWSKI et J. XU : Natural movement or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B - Planning & Design*, 20:29–66, 1993.
- [47] H. HOANG et B. ANTONCIC : Network-based research in entrepreneurship : A critical review. *Journal of Business Venturing*, 18(2):165–187, 2003.
- [48] G.J. HOSPERS : Coping with shrinkage in Germany and the United States : A Cross-cultural comparative approach towards sustainable cities. *Urban Design International*, 18:90–98, 2013.
- [49] E. HOWARD : *Garden Cities of ToMorrow : A Peaceful Path to Real Reform*. S. Sonnenschein, Londres, 1898.
- [50] M. HUARD : Atlas Historique de Paris. <http://paris-atlas-historique.fr>, 2013.
- [51] M. HUGUENIN : *Historique de la cartographie de la nouvelle carte de France*. Imprimerie de l'Institut Géographique National, Paris, 1948.
- [52] C.K. HYDE : Planning a Transportation System for Metropolitan Detroit in the Age of the Automobile : The Triumph of the Expressway. *Michigan Historical Review*, 32(1):59–95, 2006.

- [53] IAU : 75 ans de planification francilienne. <http://www.iau-idf.fr/lille-de-france/75-ans-de-planification.html>, 2005.
- [54] IAU : La saga des rocades de métro au cœur de la région capitale. Note Rapide de l'IAU, 502, avril, 2010.
- [55] S.L. JACK : Approaches to studying networks : Implications and outcomes. *Journal of Business Venturing*, 25(1):120–137, 2010.
- [56] D.W. JONES : *Mass Motorization and Mass Transit : An American History and Policy Analysis*. Indiana University Press, Indianapolis, 2007.
- [57] K.J. KANSKY : *Structure of transportation networks : relationships between network geometry and regional characteristics*. University of Chicago, Chicago, 1963.
- [58] K.J. KANSKY : Measures of Network Structure. *Flux*, 5(1):93–121, 1989.
- [59] M. KAPLAN : Hard Choices : Responding to America's Infrastructure Problems. *Built Environment*, 10(4):245–252, 1984.
- [60] D. LARROQUE, M. MARGAIRAZ et P. ZEMBRI : *Paris et ses transports, XIX^e - XX^e siècles. Deux siècles de décisions pour la ville et sa région*. Éditions Recherches/AHICF, Paris, 2002.
- [61] E. LAZEGA : Analyse de réseaux d'une organisation collégiale : les avocats d'affaires. *Revue Française de Sociologie*, pages 559–589, 1992.
- [62] P. LE GALES : *Le retour des villes européennes - Sociétés urbaines, mondialisation, gouvernement et gouvernance*. Presses de Sciences Po, Paris, 2011.
- [63] R. LEBRASSEUR et Y. ROBICHAUD : Les réseaux formels de relations comme facteur de développement économique. *Revue Du Nouvel-Ontario*, 23:9–32, 1999.
- [64] V. LEFEBVRE : Le Réseau Formel d'Entrepreneurs comme dispositif d'accompagnement entrepreneurial. *Entreprendre & Innover*, 19, 2014. à paraître.
- [65] B. LETEINTURIER, P. ENGELS, F. PETIT, A. CHIFFAUT et F. MAILASSE : 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. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 6(4):239–251, 2000.
- [66] K.C. LIN : Le développement du réseau routier en Chine : conséquences et inégalités. *Revue internationale de politique comparée*, 18(3):151–179, 2011.

- [67] A. LUESCHER et S. SHETTY : Editorial : An introductory review to the special issue : Shrinking Cities and Towns : Challenges and Responses. *Urban Design International*, 18(1):1–5, 2013.
- [68] B. MARCHAND : Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment : A French example. *Environment and Planning A*, 6(5):491–507, 1974.
- [69] S. MARTELLE : *Detroit : A Biography*. Chicago Review Press, Chicago, 2010.
- [70] B. MCCANN : *Completing our Streets : the Transition to Safe and Inclusive Transportation Networks*. Island Press, Washington, 2013.
- [71] N. MILLINGTON : Post Industrial imaginaries : nature, representation and ruin in Detroit, Michigan. *International Journal of Urban and Regional Research*, 37(1):279–296, 2013.
- [72] Premier MINISTRE : Schéma directeur d'aménagement et d'urbanisme de la région de Paris. Délégation générale au district de la région de Paris, 1965.
- [73] W.A. MURACO : Intraurban Accessibility. *Economic Geography*, 48: 388–405, 1972.
- [74] D. NOIN, éditeur. *Atlas des Parisiens*. Masson, Paris, 1984.
- [75] Bureau of LABOR STATISTICS : Some Factors Affecting Housing Density and Auto Ownership. *Monthly Labor Review*, 90(3):45–46, 1967.
- [76] J.M. OFFNER : Les effets structurants du transport : mythe politique, mystification scientifique. *L'Espace Géographique*, 3:355–366, 1993.
- [77] J. PAILHOUS : *Représentation de l'espace urbain et cheminements : l'exemple du chauffeur de taxi*. Presses Universitaires de France, 1970.
- [78] S.C. PARKER : The economics of formal business networks. *Journal of Business Venturing*, 23(6):627–640, 2008.
- [79] C.S. PEIRCE : *Écrits sur le signe, rassemblés traduits et commentés par G. Deledalle*. Le Seuil, Paris, 1978.
- [80] M. PELLETIER : *Les cartes des Cassini, la science au service de l'État et des provinces*. CTHS, Paris, 2013.
- [81] A. PENN : Spatial syntax and spatial cognition or why the axial line ? *Environment and Behavior*, 35(1):30–65, 2003.
- [82] G. PÉREC : *Espèces d'espaces*. Galilée, Paris, 1974.
- [83] K. PINHO : Dan Gilbert to Buy 4 More Downtown Detroit Properties. Crain's Detroit Business, 2014. <http://www.crainsdetroit.com/>.

- [84] S. PORTA, P. CRUCITTI et V. LATORA : The network analysis of urban streets : A dual approach. *Physical A - Statistical Mechanics and Its Applications*, 369:853–866, 2006.
- [85] E. PRETECEILLE : *La division sociale de l'espace francilien. Typologie socioprofessionnelle 1999 et transformations de l'espace résidentiel 1990-99*. FNSP/CNRS, Observatoire sociologique du changement, Paris, 2003.
- [86] M.U. PROULX : Réseaux utilitaires spatialisés et dynamique économique. *Revue Canadienne de Science Régionale*, 14(1):73–92, 1991.
- [87] J. PRUD'HOMME : *Estimation et analyse spatiales des émissions de polluants de transports individualisés. Évaluation des performances environnementales d'un Transport à la Demande*. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2013.
- [88] R. PRUD'HOMME et C.W. LEE : Size, Sprawl, Speed and the Efficiency of Cities. *Urban Studies*, 36(11):1849–1858, 1999.
- [89] S. PSARRA, C. KICKERT et A. PLUVIANO : Paradigm lost : Industrial and post-industrial Detroit - An analysis of the street network and its social and economic dimensions from 1796 to the present. *Urban Design International*, 18(4):257–281, 2013.
- [90] D. PUMAIN, T. PAQUOT et R. KLEINSCHMAGER, éditeurs. *Dictionnaire de la ville et de l'urbain*. Economica, Paris, 2006.
- [91] J.-P. RODRIGUE, C. COMTOIS et B. SLACK : *The geography of transport systems*. Routledge, Taylor and Francis Books, Londres, 2009.
- [92] R. ROSEN : *Theoretical Biology and Complexity*. Academic Press, New York, 1985.
- [93] C. ROTH, S.M. KANG, M. BATTY et M. BARTHELEMY : A long-time limit for world subway networks. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012.
- [94] B.D. RYAN et D. CAMPO : Autopia's End : The Decline and Fall of Detroit's Automotive Manufacturing Landscape. *Journal of Planning History*, 12:95–132, 2013.
- [95] S. SADOUX, A. COSTE et T. MEEHAN : Infrastructuréctomie. Livrable du projet TerrHab, De l'habitabilité à la territorialité, à paraître.
- [96] J. SCHILLING et J. LOGAN : Greening the Rust Belt : A Green Infrastructure Model for Right Sizing America's Shrinking Cities. *Journal of the American Planning Association*, 74(4):451–466, 2008.

- [97] B. SCHOONJANS, P. VAN CAUWENBERGE et H. VANDER BAUWHEDE : Formal business networking and SME growth. *Small Business Economics*, 41(1):169–181, 2013.
- [98] S. SHANE et S. VENKATARAMAN : The promise of entrepreneurship as a field of research. *Academy of Management Review*, 25(1):217–226, 2000.
- [99] A. SHIMBEL : Structural parameters of communication networks. *Bulletin of Mathematical Biology*, 15(4):501–507, 1953.
- [100] D.A. SMITH et F.T. LOHRKE : Entrepreneurial network development : Trusting in the process. *Journal of Business Research*, 61(4):315–322, 2008.
- [101] W. STAM, S. ARZLANIAN et T. ELFRING : Social capital of entrepreneurs and small firm performance : A meta-analysis of contextual and methodological moderators. *Journal of Business Venturing*, 29(1):152–173, 2014.
- [102] D.J. STOREY : *Small business and entrepreneurship*. Financial Times Prentice Hall, New York, 2010.
- [103] S.J. SUGRUE : *The Origins of the Urban Crisis : Race and Inequality in Postwar Detroit*. Princeton University Press, Princeton, 1996.
- [104] M. THOMPSON : Ontological Shift or Ontological Drift ? Reality Claims, Epistemological Frameworks, and Theory Generation in Organization Studies. *The Academy of Management Review*, 36(4):754–773, 2011.
- [105] A. TURNER : Angular analysis. *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium*, 30, 2001.
- [106] S. VOGEL : *Handbook of Regenerative Landscape Design*, chapitre Detroit [Re]turns to Nature, pages 189–204. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2008.
- [107] E. WENGER, B. TRAYNER et M. de LAAT : Promoting and assessing value creation in communities and networks : A conceptual framework. <http://www.Knowledge-architecture.com/>, 2011.
- [108] A. YOUNG : *Travels, During the Years 1787, 1788, and 1789*. George Bell and Sons, Londres, 1909.
- [109] R. ZIMMERMAN : Making Infrastructure Competitive in an Urban World. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 626(1):226–241, 2009.

Liste des figures

1	Décomposition d'un réseau spatial en unités élémentaires et construction de la <i>voie</i>	14
2	Nombre de voies et nombre d'arcs moyens par voie à Avignon	15
3	Angle moyen entre arcs le long d'une même voie tracé pour les trois méthodes en fonction de l'angle seuil choisi	16
4	Histogramme de la distribution des angles	16
5	Paris - Carte de <i>connectivité</i>	18
6	Indicateur de <i>structuralité</i> appliqué au réseau des <i>voies</i> de Paris	20
7	Indicateur d' <i>espacement</i> appliqué au réseau des <i>voies</i> de Paris	21
8	Indicateur de <i>maillance</i> appliqué au réseau des <i>voies</i> de Paris	22
9	Indicateur de <i>perpendicularité</i> appliqué au réseau des <i>voies</i> de Paris	23
10	Visualisation des variations de l'indicateur de <i>structuralité</i> en fonction des découpages du réseau viaire autour de la ville d'Avignon	25
11	Comparaison entre l'histoire d'évolution de la ville de Manaus (à gauche) et l'application de l'indicateur de structuralité au réseau viaire actuel (à droite)	26
12	La division d'une station dans le cas d'une desserte de plusieurs lignes (Place d'Italie)	31
13	La division d'une station dans le cas d'un embranchement de la ligne (Esbly)	31
14	La prise en compte des principaux trains directs (Choisy-le-Roi)	32
15	L'accessibilité en 1975 : un gradient centre-périphérie depuis Paris	34
16	L'extension du réseau pour desservir des pôles <i>extra-muros</i> . .	35
17	D'une politique de développement polycentrique à la rénovation urbaine	38
18	Les projets du Grand Paris : vers un rattrapage de la petite couronne?	42

19	Efficacité d'un trajet	48
20	Localisation des flux matérialisés sur le réseau de Dallas selon la hiérarchisation des tronçons de route	57
21	L'usine Packard (à gauche) et <i>Michigan Grand Station</i> (à droite)	59
22	Perspective du <i>superhighway</i> proposé par la <i>Detroit Rapid Transit Commission</i> en 1923	62
23	Woodward Avenue en 1907	63
24	Projet M1 Rail	64
25	Densités de population par mile carré	65
26	Scénario de renouvellement à dix ans	69
27	Approche stratégique du renouvellement	69
28	Le modèle d'urbanisation des <i>garden cities</i> proposé par Howard	71
29	Réseau d'infrastructure paysagère	76
30	Réseau d'infrastructure paysagère	77
31	<i>Bloody Run</i>	78
32	<i>Bloody Run</i> : du gris au vert	79
33	Paysages productifs	80
34	Tracés originaux de <i>Bloody Run Creek</i>	81
35	Projet de <i>Bloody Run Creek</i>	83
36	Projet de <i>Bloody Run Creek</i> : concept hydrologique	84
37	Projet de <i>Bloody Run Creek</i> , première phase	84
38	Création de valeur et cycles des réseaux	94
39	Modèle de stades d'évolution de la confiance cognitive et af- fective au sein de réseaux entrepreneuriaux	95
40	Proposition d'approche méthodologique des Réseaux Formels d'Entrepreneurs	96
41	Répartition de la production d'énergies renouvelables en Eu- rope telle qu'envisagée par le projet <i>e-Highway 2050</i>	101
42	Points de congestion du réseau européen, carte réalisée à partir des modèles du réseau utilisés par les gestionnaires de réseau européens	103
43	Éléments de construction d'une <i>smart grid</i>	104
44	Superposition de la base de données Route 120 de l'IGN (gris) et de la carte de Cassini numérisée (noir)	116
45	Analyse de la carte comme un modèle relationnel et mise en correspondance de la carte de Cassini et de la base de données Route 120 de l'IGN	117
46	Carte de Cassini vectorisée en superposition avec Route 120 IGN sur la région des Landes	121
47	Tardenois et Montagne de Reims	122

48	Superposition de la carte de Cassini et de Route 120	123
49	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	124
50	Extrait de la carte de Cassini dans la région de Reims, avec en superposition le réseau vectorisé, Route 120 et Route 500 .	126

Liste des tableaux

1	Importance des routes et vitesses appliquées sur les réseaux français	49
2	Vitesses appliquées sur le réseau de Dallas	50
3	Distances parcourues selon les réseaux routiers	53
4	Indicateurs de description des réseaux	53
5	Comparaison distances entre réseau à vitesse constante et réseau hiérarchisé	54
6	Modification des indices « réseau » avec l'application des vitesses sur les réseaux	55

Auteur-e-s

Adrien BÉZIAT, Doctorant, Université Paris Est, IFSTTAR-SPLOTT (Aménagement et Urbanisme), adrien.beziat@ifsttar.fr

Olivier BONIN, IFSTTAR - LVMT UMR T 9403, olivier.bonin@ifsttar.fr

Patricia BORDIN, Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, Cachan, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut des Énergies de Demain (IED), patricia.bordin@geospective.fr

Stéphane DOUADY, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Matière et Systèmes Complexes (MSC), stephane.douady@univ-paris-diderot.fr

Adeline HEITZ, Doctorante, Université Paris Est, IFSTTAR-SPLOTT (Aménagement et Urbanisme), adeline.heitz@ifsttar.fr

Claire LAGESSE, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Matière et Systèmes Complexes (MSC), lagesse.claire@gmail.com

Vincent LEFEBVRE, Professeur d'entrepreneuriat, ISC Paris Business School (jusqu'en septembre 2014), AUDENCIA Nantes (à partir de septembre 2014), Membre du LIRSA (CNAM Paris), vincent.lefebvre@iscparis.com

Tricia MEEHAN, Architecte, Maître Assistant Associé, École nationale supérieure d'architecture de Grenoble / LabEx Architecture, Environnement & Cultures Constructives, meehan.p@grenoble.archi.fr

Angélique PALLE, Doctorat de Géographie 2^e année, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, angelique.palle@malix.univ-paris1.fr

Julie PRUD'HOMME, LABEX Futurs Urbains - PRES Université Paris-Est -
LISA - UMR CNRS 7583 (UPEC-UPD), Julie.Prudhomme@lisa.u-pec.fr

Stéphane SADOUX, Urbaniste, Maître Assistant, École nationale supérieure
d'architecture de Grenoble / LabEx Architecture, Environnement & Cultures
Constructives, sadoux.s@grenoble.archi.fr