



Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris

Claire Lagesse, Philippe Bonnin, Patricia Bordin, Stéphane S. Douady

► To cite this version:

Claire Lagesse, Philippe Bonnin, Patricia Bordin, Stéphane S. Douady. Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris. Flux - Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et territoires, 2016, 105, pp.33-49. <hal-01402708>

HAL Id: hal-01402708

<https://hal.science/hal-01402708v1>

Submitted on 31 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION ET DE CARACTÉRISATION DES RÉSEAUX SPATIAUX. APPLICATION AU RÉSEAU VIAIRE DE PARIS

[Claire Lagesse](#), [Philippe Bonnin](#), [Patricia Bordin](#), [Stéphane Douady](#)

Université Gustave Eiffel | « [Flux](#) »

2016/3 N° 105 | pages 33 à 49

ISSN 1154-2721

DOI 10.3917/flux.105.0033

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-flux-2016-3-page-33.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Université Gustave Eiffel.

© Université Gustave Eiffel. Tous droits réservés pour tous pays.





Méthodologie de modélisation et de caractérisation des réseaux spatiaux. Application au réseau viaire de Paris

Claire Lagesse
Philippe Bonnin
Patricia Bordin
Stéphane Douady

INTRODUCTION

Les travaux étudiant les graphes spatiaux, et notamment ceux représentant des réseaux de transports, débutèrent dans les années 1960. Cependant, ils se concentrèrent dans un premier temps uniquement sur les propriétés topologiques de tels réseaux, essayant de qualifier leurs structures en étudiant la *centralité* de leurs nœuds. Les chercheurs disposaient à l'époque d'une quantité limitée de données, et étaient contraints par les techniques de modélisation, la mémoire et la puissance de calcul informatique (Garrison, Marble, 1962 ; Haggett, Chorley, 1969). Les réseaux de transports se développant, les études se concentrèrent sur les flux dans des graphes valués aux géométries très différentes (Newell, 1980 ; Vaughan, 1987). Les schémas de connexion des réseaux routiers intéressèrent également les scientifiques : Garrison (1960) se pencha sur ceux du réseau autoroutier des USA, Kansky (1963) affina la caractérisation topologique des réseaux de transports, Taylor *et alii* (1995) étudièrent les liaisons des voies rapides. Au début du XXI^e siècle, les chercheurs entamèrent des études statistiques de *grands graphes* aux propriétés spatiales plus ou moins conservées (Albert, Jeong, Barabási, 1999 ; Barabási, Frangos, 2002 ; Barabási, Bonabeau, 2003 ; Newman, 2003).

L'analyse de la continuité des liens entre les arcs d'un graphe routier a été explorée dans différents travaux. Nous pouvons tout d'abord citer ceux de *Syntaxe Spatiale*, menés par Hillier, qui à ses débuts cherchait à reconstruire des

lignes de perspectives pour étudier la structure du réseau (Hillier *et alii*, 1976 ; Hillier *et alii*, 1993 ; Hillier, 1999). Les chercheurs procédaient alors à une analyse géométrique du réseau viaire corrélée à une analyse psychologique du piéton évoluant dans celui-ci (Penn, 2003 ; Hillier, Hanson, 1984 ; Hillier, Iida, 2005 ; Hillier, 2006), dans le but de comprendre comment l'utilisateur perçoit son environnement et à quel niveau de profondeur se situent les rues autour de lui, selon une distance qualifiée d'*angulaire*. Avec le temps, les travaux de syntaxe spatiale se sont affinés autour de cette notion d'angle à chaque carrefour qui impacte la perception du réseau par l'utilisateur. Il a été ainsi possible d'évaluer la sensibilité des itinéraires aux angles entre segments (Hillier, Vaughan 2007). Plus une combinaison de segments est continue et alignée, plus les tronçons routiers apparaîtront comme *centraux*. Les chercheurs utilisent leur théorie pour proposer des projets urbains qui permettraient théoriquement d'améliorer l'accès au centre-ville et ainsi de décongestionner certains espaces problématiques (Hillier, 2009).

L'idée de créer un « sur-réseau » a également été explorée par Jiang et Claramunt (2004), qui fondaient la continuité entre deux segments à une intersection sur leurs toponymes, reconstituant ainsi les rues de la vie quotidienne (mais qui peuvent changer brusquement de nom sans raison). Ils inversèrent ensuite la modélisation de l'espace en considérant les liens (continuité de tronçons) comme des nœuds et les nœuds (intersections) comme des liens, créant ainsi le graphe *dual* de

l'espace viaire. L'information géographique disparaît ainsi derrière l'information topologique.

Xie et Levinson (2007) ont eux aussi soulevé l'importance de l'alignement et y répondent avec la création d'*artères* sur le réseau, correspondant à un *sur-réseau* (hypergraphe). Ils ont pu ainsi établir une hiérarchie entre les différentes parties du réseau viaire et étudier l'efficacité d'un réseau aux grands axes sur la distance parcourue par l'utilisateur.

Une autre analyse remarquable, basée sur la théorie de la *syntaxe spatiale*, a été opérée par Porta, Crucitti et Latora. Ils ont développé une méthode baptisée *ICN* (*Intersection Continuity Negotiation*) afin de créer des lignes droites dans le graphe (Porta, Crucitti, Latora, 2006). Pour chaque arc, l'algorithme recherche l'arc connecté qui lui est le plus aligné : ils sont identifiés comme appartenant à la même *ligne droite*. Une fois qu'un arc est associé et ajouté à une *ligne droite*, il est retiré de l'ensemble des arcs restants pour le calcul. La procédure est ainsi répétée jusqu'à ce que tout le réseau soit parcouru. C'est une méthodologie purement spatiale.

L'analyse de la continuité sur un graphe spatial ayant pour but la création d'un hypergraphe d'éléments alignés a donc été étudiée sous différentes formes. Nous montrerons ici que la construction d'un objet multi-échelle, à la paramétrisation claire et robuste au sens de lecture du graphe, permet une étude approfondie du réseau viaire. Pour cela, à partir de la décomposition du réseau en objets élémentaires cohérents avec son emprise au sol, nous construisons un objet complexe continu : la *voie*. Cet objet a pour but de créer un hypergraphe d'éléments géographiques, répondant à un critère d'alignement. Il est important de préciser que nous ne travaillons que sur des graphes non orientés et connexes. Nous nous limitons à l'information minimale fournie par le filaire : la géométrie et la topologie du réseau. Quel que soit le cas d'application, nous ne considérerons dans le réseau spatial que l'axe central de l'objet physique, dénué de toute autre information attributaire. Par exemple, dans un graphe routier, le sens de circulation n'est pas une donnée prise en compte : les arcs sont supposés mener d'une intersection à une autre indifféremment. Sur l'échantillon

spatial considéré, nous ne conservons que la plus grande partie connexe (nous l'identifions comme étant celle qui comprend le plus d'arcs).

Après avoir expliqué comment nous élaborons l'objet *voie*, rigoureusement défini, nous détaillerons la construction de cinq indicateurs qui nous permettent de proposer une analyse du réseau à partir de ses propriétés topographiques et topologiques. Nous appliquerons nos analyses et visualiserons nos résultats sur le réseau viaire de Paris. Nous utiliserons pour cela des données issues de la BDTOPO 2014 fournies par l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) (1).

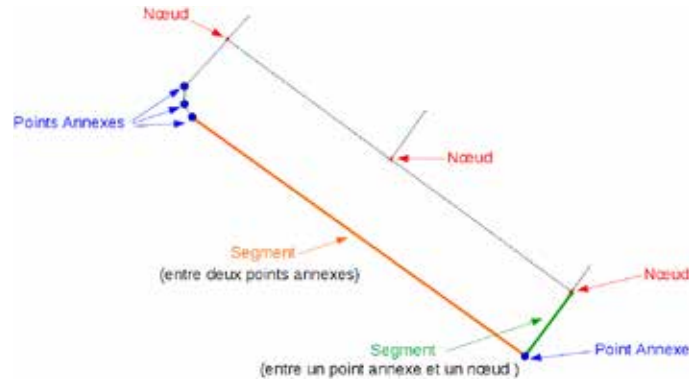
CONSTRUCTION D'UN OBJET COMPLEXE CONTINU : LA VOIE

Pour construire un graphe spatial à partir de réseaux physiques, nous commençons par les déconstruire afin de réduire l'information géométrique qu'ils portent à une unité élémentaire : le segment. Ainsi, dans de tels réseaux, nous ne considérons que la géométrie de l'axe central du réseau, le squelette de la structure. À partir de ce filaire, nous positionnons des *sommets* aux intersections et des *points annexes* aux changements de direction. Entre un sommet et un point annexe ou entre deux points annexes, nous avons donc des *segments*, au sens mathématique du terme : ligne droite entre deux points. Ce segment est l'unité spatiale linéaire la plus petite de notre graphe (Figure 1). Entre deux sommets les segments sont regroupés pour former des arcs (Figure 2).

Nous obtenons ainsi un graphe, constitué de sommets et d'arcs $G(S,A)$ dont la géométrie est fixée : les points annexes précisent son inscription spatiale en donnant des coordonnées à chaque changement de direction. On peut ainsi associer l'information géométrique des arcs à l'information topologique, propre à tous les graphes (2).

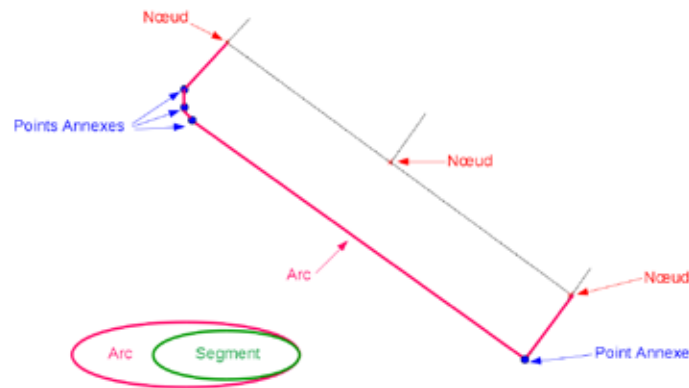
Dans le langage commun, la notion de *voie* est très polysémique. Elle peut avoir pour signification *route*, *rue*, *chemin*, *passage*, mais également *direction prise*. La *voie* est ici un objet que nous construisons, localement, à chaque sommet s d'un graphe $G(S,A)$ (S étant l'ensemble des sommets $\{s\}$ et A l'ensemble des arcs du graphe $\{a\}$). Pour chaque sommet, nous considérons les arcs connectés et les déviations formées par chaque couple d'arcs (Figure 3a). La déviation considérée est

Figure 1. Positionnement des sommets, points annexes et segments sur un extrait schématique



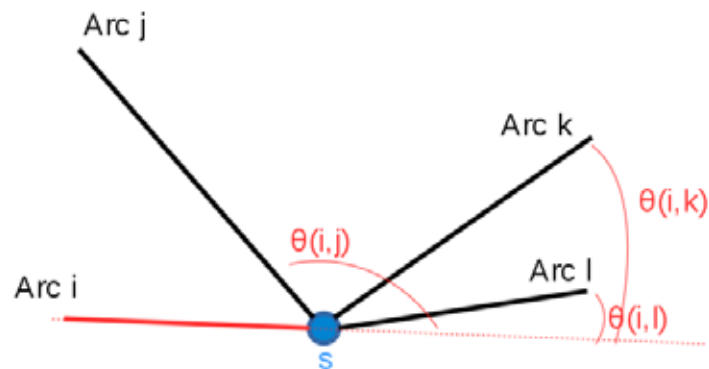
Réalisation : Claire Lagesse

Figure 2. Création des arcs, par association des segments entre deux sommets



Réalisation : Claire Lagesse

Figure 3a. Exemple d'un sommet s sur lequel se joignent 4 arcs i, j, k et l



L'arc i est pris comme arc de référence pour l'itération illustrée et le schéma fait apparaître les angles que l'on considère à partir de i pour les autres arcs.

Réalisation : Claire Lagesse

l'angle formé par les directions (complémentaire à 180° de celui fait par les deux arcs) (3).

Nous développons et comparons trois méthodes pour la construction de la voie, chacune ayant des critères d'association différents :

- M0 : les arcs sont associés par ordre de déviation minimale (la déviation restant inférieure à un angle seuil).
- M1 : les arcs sont associés de façon à minimiser la somme de l'ensemble des déviations (toujours en respectant un angle seuil).
- M2 : les arcs sont associés aléatoirement à chaque sommet (méthode *blanche*), tout en respectant un angle seuil.

- La méthode M0 procède par itérations successives sur chaque sommet. Elle consiste à sélectionner itérativement le couple d'arcs liés au sommet ayant l'angle de déviation minimum. Si celui-ci est inférieur à l'angle seuil, les arcs sont appariés et retirés du calcul. L'itération suivante est amorcée et ce, jusqu'à ce que l'angle de déviation minimum dépasse l'angle seuil fixé. Quand cette situation est atteinte, les arcs restants sont identifiés comme étant *célibataires*. Ils constitueront une extrémité de voie.

- La méthode M1 consiste à calculer pour chaque sommet toutes les combinaisons possibles de couples d'arcs qui respectent l'angle de déviation maximal (seuil). Pour chaque combinaison, l'ensemble des angles de déviation est sommé. La combinaison ayant la somme de déviation minimale est retenue. De même, les arcs non appariés restent célibataires.

- La méthode M2 couple à chaque sommet les arcs aléatoirement tout en respectant l'angle seuil fixé. Cette méthode pourra donc également voir des arcs non appariés.

La figure 3b illustre la différence d'association d'arcs en fonction de la méthode choisie. Pour chacune de ces trois méthodes nous testons l'impact du choix de l'angle seuil à partir duquel les deux arcs ne seront plus considérés comme assurant une continuité, et ne pourront donc plus appartenir à la même voie. Si cet angle est égal à 0° , les arcs ne pourront être couplés que s'ils sont exactement alignés (aucune déviation possible). Au contraire, s'il est égal à 180° alors il n'y a aucune contrainte d'alignement. Porta, Crucitti et Latora (2006) utilisaient dans leur étude un angle de déviation maximale de 30° alors que Courtat, Gloaguen et Douady (2011) le fixaient à 90° . Ces

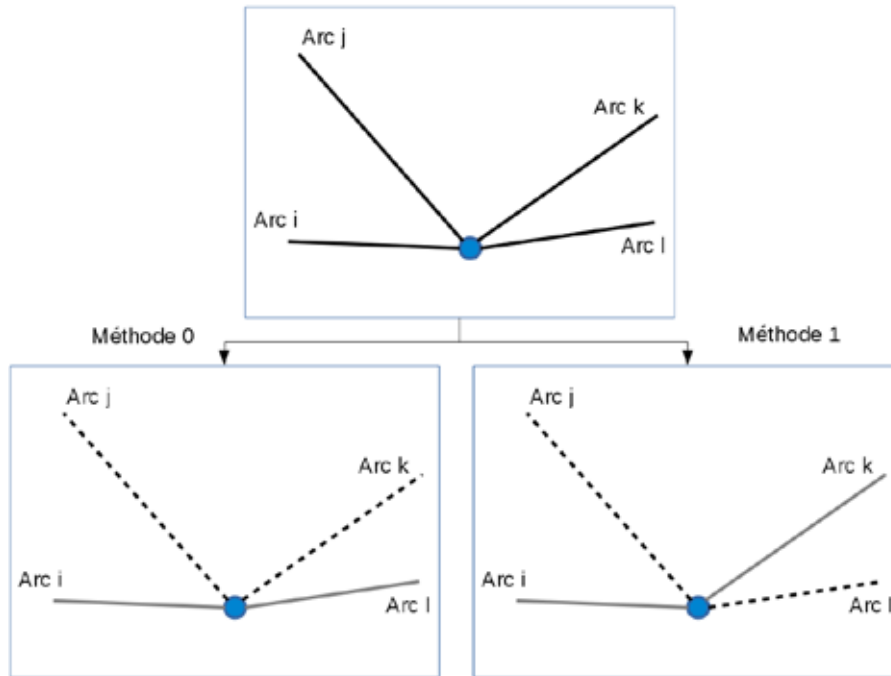
auteurs utilisaient une méthode de construction privilégiant le meilleur alignement par paires (angle de déviation minimal). Nous ne détaillerons pas ici l'étude statistique qui permet de démontrer la pertinence de la construction de la voie à travers la comparaison avec la méthode blanche (M2). Elle permet d'établir que la méthode la plus efficiente pour construire l'objet *voie* pertinent est celle associant itérativement à chaque sommet les arcs qui s'y joignent en formant le plus petit angle de déviation (M0) avec un angle seuil de déviation maximal de 60° . L'ensemble de cette analyse a été publié dans (Lagesse, Bordin, Douady, 2015).

Dans la suite de ce papier, nous construirons systématiquement les voies avec la méthode M0 et un angle seuil de 60° . Les voies ainsi créées représentent un hypergraphe du réseau spatial. Pour étudier certaines propriétés de cet hypergraphe (appelé *graphe spatial primal des voies*), il est nécessaire de construire son graphe *dual* : chaque voie sera représentée par un nœud (sommet) et les connexions entre voies constitueront les liens (arcs) du graphe dual (Figure 4). Cette méthode classique de représentation d'un graphe spatial a précédemment été utilisée par Hillier et alii (1976) puis Porta, Crucitti, Latora (2006) ainsi que Barthélemy (2011). Elle permet de calculer le plus aisément des indicateurs sur l'hypergraphe des voies liés aux distances topologiques entre celles-ci. Cette notion sera développée pour l'indicateur d'*accessibilité*.

L'élaboration de la voie, à partir de règles simples, est fondée sur la géométrie du filaire numérisé aux intersections. Elle est donc sensible aux discontinuités introduites récemment dans un réseau plus ancien (ronds-points, par exemple). En revanche, elle n'est pas impactée par la granularité de la numérisation entre le premier et dernier segments des arcs, du moment que ces deux segments conservent leur orientation.

Pour pallier la sensibilité de la construction à la vectorisation des intersections, nous avons développé une méthode complémentaire permettant de résoudre les petites discontinuités (artefacts parasites) qui pourraient impacter les calculs. Suivant les paramètres choisis nous pouvons faire disparaître les décrochements ou les ronds-points, joignant ainsi les axes artificiellement disjoints. Il nous est également possible de prendre en compte les vraies places de la ville si nous en possédons la vectorisation. Le détail de cette procédure se trouve dans (Lagesse, 2015).

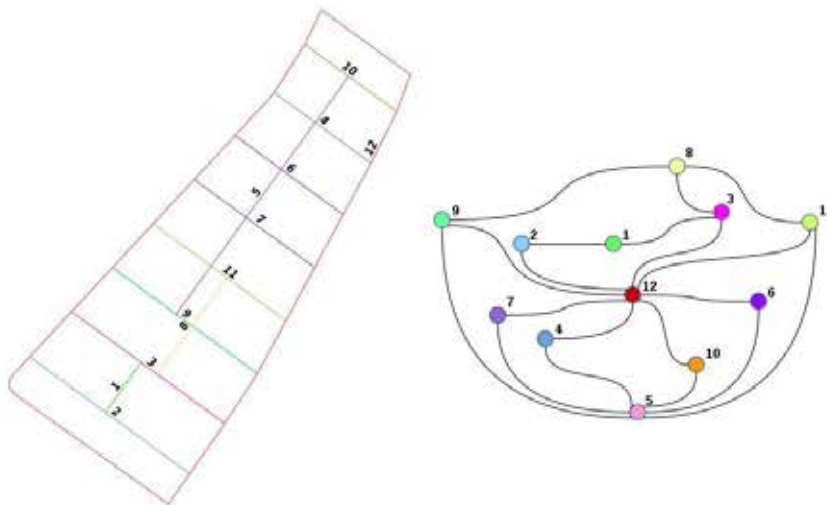
Figure 3b. Exemple d'un sommet s sur lequel se joignent 4 arcs i, j, k et l



Représentation des différentes associations d'arcs selon la méthode choisie. On suppose ici que les associations respectent l'angle seuil fixé.

Réalisation : Claire Lagesse

Figure 4. Construction du graphe dual des voies (à droite) à partir du graphe spatial primal (à gauche) constitué par un échantillon schématisé



Réalisation : Claire Lagesse

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS POUR UNE CARACTÉRISATION SPATIALE

Le développement d'indicateurs, notamment pour mesurer la *centralité* des éléments dans un graphe, a été une des premières préoccupations des scientifiques. Il s'agit en cela de déterminer quels sont les éléments les plus influents dans un réseau. Quels sont ceux qui le perturberaient le plus en disparaissant ou bien le contamineraient le plus vite. La première conception de centralité fut proposée par Bavelas (1948) qui étudia les réseaux de communication. Cet auteur considère alors qu'un sommet est central dans le réseau si un grand nombre de chemins *les plus courts* passent par celui-ci. Il posa ainsi les fondements d'un indicateur structurel essentiel dans la théorie des graphes : la *betweenness*. Il assimile dans son travail le potentiel *bloquant* des sommets à l'indicateur de *betweenness* élevé.

Cette idée fut reprise par Shimmel (1953) qui estime que les *stations intermédiaires* traversées sur un chemin ont un impact sur celui-ci. Selon lui, elles imposent un *stress* au chemin. Il mesure ainsi le *stress* de chaque sommet en fonction du nombre de chemins les plus courts dans lesquels ils sont inclus. Cohn et Marriott (1958) approfondirent ce travail en considérant l'impact de la centralité différemment. Ils ne parlèrent plus en termes de potentiel *bloquant* ou *stressant* mais observèrent la capacité des sommets centraux à fédérer le réseau autour d'eux et à coordonner l'activité des autres sommets.

La plupart des premiers travaux sur la centralité considèrent la somme de toutes les distances minimales entre un point et les autres du graphe pour déterminer s'il est central ou non (Bavelas, 1950 ; Beauchamp, 1965 ; Sabidussi, 1966). Ceci pose le problème des calculs de centralité dans les graphes non connexes : la distance entre deux points situés dans deux parties non connectées étant infinie. Partant de ce constat, Freeman (1977) propose une formalisation mathématique de la *betweenness* la rendant compatible avec des graphes non connexes.

Aux côtés de la *betweenness*, plusieurs autres mesures de centralités furent également explorées. Nous dénombrons ainsi parmi les plus connues : la *degree centrality* (liée au degré des sommets), la *closeness centrality* et la *Eigenvector centrality*. Toutes ces mesures ont été créées sur des graphes formalisant des liens sociologiques, où seule la topologie est significative. Certains scientifiques en ont déjà exploré l'application sur des graphes spatialisés (Crucitti, Latora, Porta, 2006 ; Barthélemy

et alii, 2013). Nous verrons dans cette partie les informations que peuvent apporter des indicateurs choisis appliqués aux voies.

Nous traiterons tout d'abord d'indicateurs locaux, qui sont calculés en fonction de la géométrie et de la topologie de l'objet *voie* considéré et de son entourage direct. Ils sont robustes aux découpages de l'échantillon spatial à la condition que la géométrie et le voisinage de l'objet considéré restent inchangés. L'effet de bord ne pourra donc avoir d'impact que sur les arcs (ou les voies) en limite du réseau découpé. Nous détaillerons ici quatre indicateurs locaux : le *degré*, le *degré de desserte*, l'*espacement* et l'*orthogonalité*.

Puis nous expliciterons un indicateur global, que nous nommons *accessibilité*. Celui-ci est calculé pour chaque voie sur l'ensemble du réseau. Nous montrerons que son utilisation sur la voie, objet multi-échelle, rend son calcul robuste aux effets de bord.

Le degré et le degré de desserte

Pour un sommet, le degré correspond au nombre d'arcs qui lui sont reliés. Pour calculer le degré des arcs ou des voies dans un graphe spatial, on peut se rapporter au cas précédent en traçant son graphe dual (Figure 4) : un arc (resp. une voie) devient alors un sommet, et son degré correspond au nombre d'autres arcs (resp. voies) auxquels il est connecté. Il est utile d'observer le degré des éléments d'un réseau afin de définir leur importance dans la connexité de celui-ci, c'est-à-dire, à quel point les sommets sont connectés (les sommets correspondant dans ce cas à des arcs ou des voies du réseau).

La mesure de la connectivité (4) est utilisée pour explorer la topologie des réseaux. Elle a été étudiée sous différents aspects par Haggett et Chorley (1969), Taaffe (1996), Rodrigue, Comtois et Slack (2004). Depuis les années 1960, elle est appliquée aux réseaux spatiaux, et notamment de transport. Un des premiers à se pencher sur la question fut Garrison (1960), qui mesura la connectivité du réseau autoroutier entre les états des USA. Puis, Kansky (1963) proposa quatorze indicateurs pour mesurer les caractéristiques topologiques des réseaux de transport. Dill (2004) se pencha sur le point de vue des piétons et cyclistes et étudia la connectivité du réseau viaire de Portland (Oregon). Xie et Levinson (2007), quant à eux, définirent des schémas de connexions élémentaires entre quatre à six sommets (qu'ils nomment *ring*, *web*, *star* et *hub and spoke*). Ils peuvent de cette manière comparer différents réseaux en

sommant le nombre de ces schémas qui se retrouvent dans chacun d'eux. En 2006, Latora et son équipe se penchèrent également sur l'étude du degré des sommets du dual de leurs lignes droites (Crucitti, Latora, Porta, 2006 ; Cardillo *et alii*, 2006 ; Scellato *et alii*, 2006).

Dans notre étude nous commençons par comparer l'apport de la caractérisation du réseau par le degré des voies avec l'exemple des arcs du réseau viaire de Paris (Figures 5 et 6). Nous observons ainsi que la construction d'un objet complexe nous permet de hiérarchiser les structures et de définir

un schéma cohérent de l'espace. Nous voyons ressortir les structures les plus connectées, qui sont aussi celles que les urbanistes et les historiens repèrent comme les grands axes de circulation dans la capitale (périphériques, boulevards), ou des structures plus anciennes sur lesquelles s'est construit le réseau, comme la rue Saint Jacques (Huard, 2013). Si nous comparons ce résultat à celui obtenu sur les seuls arcs nous mettons en évidence l'apport de la voie dans la définition d'une structure cohérente de l'espace : au lieu d'une caractérisation ayant une forte dépendance aux effets de bords, nous obtenons

Figure 5. Degré des arcs calculé sur le réseau viaire de la commune de Paris



Les résultats sont classés par ordre croissant dans 10 classes qui regroupent chacune un dixième de la longueur totale du réseau. Cette représentation est utilisée pour faciliter la lecture de l'indicateur.

Réalisation : Claire Lagesse

Figure 6. Degré des voies calculé sur le réseau viaire de la commune de Paris



Les résultats sont classés par ordre croissant dans 10 classes qui regroupent chacune un dixième de la longueur totale du réseau.

Réalisation : Claire Lagesse

une caractérisation qui met en avant des axes qui traversent l'espace du réseau, résultat très peu sensible au découpage de la carte.

En affinant le calcul du degré pour les voies, nous pouvons considérer une information supplémentaire : le nombre d'arcs auxquels une voie est connectée. Il diffère légèrement de son degré car une voie peut intersecter une autre voie en la coupant en son centre (et être donc reliée à deux arcs) ou à son extrémité (elle n'est dans ce cas reliée qu'à un seul arc). Nous appellerons cet indicateur la connectivité car il fait référence aux travaux précédents effectués sur la topologie des réseaux

spatiaux, où étaient considérées les connexions directes d'un objet aux autres. Ce travail ne peut pas être effectué sur le graphe dual, car dans celui-ci tous les sommets sont de même nature (dans le graphe dual des voies, tous les sommets représentent des voies : l'information des arcs est perdue).

Pour calculer l'indicateur de connectivité, nous nous plaçons dans le graphe spatial primal des voies $G(S, V)$. Nous considérons les sommets d'une voie v_{ref} . Pour chaque sommet $s \in v_{ref}$, nous dénombrons les arcs qui y sont liés et qui ne font pas partie de la voie pour laquelle nous faisons le calcul.

$$connectivité(v_{ref}) = \text{card}[\text{arcs } a / (a \cap v_{ref} \wedge a \not\subseteq v_{ref})]$$

En pratique, ce calcul donne un résultat en général proche de celui obtenu pour les degrés. Il permet néanmoins de distinguer les voies dont l'inclusion dans le réseau est la plus forte, en soustrayant le *degré* à la *connectivité* pour chaque voie. En effet, plus cette différence a une valeur élevée, plus cela signifie que la voie intersecte son voisinage *centralement* (sans être à une de ses extrémités). En mettant en valeur les voies pour lesquelles le résultat de la soustraction est le plus important, nous retrouvons sur Paris les principales voies (5) de circulation : longues voies anciennes (rue Saint-Jacques, rue Saint-Denis, etc.), les voies de contournement bâties aux emplacements des enceintes successives, percements (rue Turbigo, rue Lafayette, etc.) (Figure 7). Nous qualifions cet indicateur de *degré de desserte* de l'espace.

$$\text{degréDesserte}(v_{\text{ref}}) = \text{connectivité}(v_{\text{ref}}) - \text{degré}(v_{\text{ref}})$$

L'analyse topologique de la voie, sans considérer l'ensemble du réseau, est donc déjà révélatrice de structures, d'ordre (hiérarchisation des voies) et d'usages (déplacements piétons particulièrement) (Genre-Grandpierre, 2002 ; Genre-Grandpierre, Foltête, 2003).

L'espace

Le rapport de la longueur et de la *connectivité* des voies nous fournit une mesure inverse de la densité linéaire locale du réseau, *espacement* entre les intersections le long d'une voie. En effet, quel que soit le réseau spatial considéré les voies courtes

Figure 7. Degré de desserte des voies calculé sur le réseau viaire de la commune de Paris

Degré de desserte

voies

- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 60
- 60 - 120



Réalisation : Claire Lagesse

et très connectées servent à une desserte fine de l'espace alors que les plus longues et peu connectées servent à des transitions rapides entre différents points de l'espace. Elles structurent celui-ci avec des axes de découpages nets.

Nous calculons donc un nouvel indicateur, appelé *espacement* issu de la division de la longueur d'une voie par sa connectivité.

$$\text{espacement}(v_{ref}) = \frac{\text{longueur}(v_{ref})}{\text{connectivité}(v_{ref})}$$

En appliquant l'*espacement* aux réseaux viaires, les voies avec une valeur faible sont souvent révélatrices de centres-villes

denses ou de quartiers résidentiels d'immeubles élevés, alors que les voies avec une valeur élevée sont plutôt des voies rapides.

Ainsi, sur le réseau routier de Paris, nous observons la mise en valeur par cet indicateur des voies rapides (qui apparaissent en bleu) et des quartiers denses soulignés en rouge (anciennes communes annexées à Paris ou centre historique de la ville). En effet, les voies de circulation globale sont longues et moins connectées et donc ressortent avec un coefficient d'*espacement* fort. Les voies qui permettent une desserte locale, et souvent des déplacements piétons, sont quant à elles souvent courtes et très connectées. Elles ressortent donc avec un faible *espacement* (Figure 8).

Figure 8. Espacement des voies calculé sur le réseau viaire de la commune de Paris

Espacement

voies

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9



0 1 2 3 4 km

Les résultats sont classés par ordre croissant dans 10 classes qui regroupent chacune un dixième de la longueur totale du réseau.

Réalisation : Claire Lagesse

L'orthogonalité

Le dernier indicateur local que nous présenterons ici porte directement sur la géométrie des intersections entre voies. Pour construire l'indicateur d'orthogonalité nous nous intéressons au sinus des angles de connexion entre voies. Nous considérons toujours le plus petit angle fait entre deux voies à un sommet. Plus le sinus de celui-ci s'approche de 1, plus la connexion sera proche de la perpendiculaire. Plus il tend vers 0, plus le changement de voie sera fait avec un angle faible. En sommant les sinus de tous les angles de connexion des arcs à une voie donnée : $\sin(\text{angle}(\text{arc}_i, \text{arc}_j))$, et en normalisant par leur nombre total : $\text{connectivité}(v_{ref})$, nous obtenons une valeur

caractéristique de la manière dont la voie est incluse dans le réseau.

$$\text{orthogonalité}(v_{ref}) = \frac{\sum_{i \in \text{voies}} \sin(\text{angle}(\text{arc}_i, \text{arc}_j)) / (\text{arc}_i \in v_{ref} \wedge \text{arc}_j \notin v_{ref})}{\text{connectivité}(v_{ref})}$$

En calculant cet indicateur sur le réseau viaire de Paris nous observons deux extrêmes (Figure 9). Nous avons d'une part, les voies récentes de contournement de la ville (périphérique) et d'autre part, celles plus anciennes de traversée (bords de Seine). Ces voies sont connectées au reste du réseau de manière lisse, le plus souvent avec des voies d'insertion aux angles faibles. L'indicateur d'orthogonalité ressort donc dans la classe de

Figure 9. Orthogonalité des voies calculée sur le réseau viaire de la commune de Paris

Orthogonalité

voies

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9



Les résultats sont classés par ordre croissant dans 10 classes qui regroupent chacune un dixième de la longueur totale du réseau.

Réalisation : Claire Lagesse

valeur la plus basse. À l'inverse, les quartiers où les connexions se font principalement à 90° apparaissent avec un coefficient fort. Entre les deux, les grands boulevards ressortent avec un coefficient intermédiaire, transition entre la circulation rapide et la desserte locale.

L'accessibilité

Enfin, pour considérer l'importance d'un objet dans un réseau spatial, il est nécessaire d'aborder la notion de distance. Les distances sur un graphe peuvent être calculées de différentes manières. Bonnin et Douady (2013) explorent leurs définitions et interprétations. Nous retiendrons ici trois types de distance :

- La distance **Euclidienne** : distance à vol d'oiseau entre deux points du réseau, sans considérer la géométrie des arcs. Elle correspond à la ligne droite entre deux points.
- La distance **Géographique** : distance parcourue le long des voies sur le réseau pour aller d'un point à un autre. Parmi tous les chemins possibles entre deux points, nous pourrions retenir le (ou les) plus courts.
- La distance **Topologique** : distance entre deux points du réseau mesurée en nombre d'éléments traversés (nombre de voies dans notre travail). Sur le graphe dual du réseau viaire, il s'agit donc de la distance entre deux sommets (symbolisant les arcs ou les voies) comptée en nombre de sommets traversés. Chaque changement de sommet est équivalent à un changement d'arc ou de voie. Le chemin le plus court, en utilisant ce calcul de distance, sera le *chemin le plus simple* : celui qui opérera le moins de changements de voies.

Ces notions de distance 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. Il a cependant été montré dans plusieurs études que le facteur métrique n'est pas suffisant pour expliquer l'usage des villes (Marchand, 1974 ; Foltête et alii, 2002). Le *chemin le plus court* n'est donc pas le seul élément caractéristique des réseaux urbains. Les changements de direction s'avèrent également un facteur important (Turner, 2001 ; Dalton, 2001).

Nous définissons le *chemin le plus simple* comme étant celui qui optimise la distance topologique entre deux voies. Il ne s'agit pas exactement du chemin mis en évidence par Pailhous (1970) en adoptant le point de vue d'un chauffeur

de taxi : celui-ci cherche en priorité à se raccorder au réseau qualifié de *principal* (notion que nous n'avons pas encore reconstruite), sur lequel est opérée la majeure partie du trajet en minimisant à chaque grand carrefour l'azimut avec l'objectif. Le conducteur s'en détache le plus tard possible pour entrer dans un réseau qualifié de *secondaire* (de distribution locale), pour atteindre précisément sa destination. Le *chemin topologique le plus simple* est, lui, celui qui minimise le nombre de voies distinctes nécessaires pour se rendre d'une voie de référence à une autre voie. Courtat (2012) suggère que le chemin le plus simple est une bonne approximation du chemin le plus court. Vianna et Barthelemy se penchent sur leur association dans (Viana et alii, 2013). Ils les comparent et décrivent l'évolution de leurs combinaisons sur différents types de réseaux planaires (veinures de feuilles, réseau routier, physarum).

La voie porte déjà dans sa construction l'importance de la continuité et de la linéarité. Nous lui appliquons un indicateur global combinant distance topologique entre les voies et distance géographique (longueur de la voie). Nous créons ainsi l'indicateur d'*accessibilité* (6), qui représente la distance entre une voie donnée et l'ensemble du réseau. Il est le fruit du calcul d'une distance de *simplicité* sur l'ensemble du réseau (distance topologique faite sur toutes les voies) pondérée par la longueur (Courtat, Gloaguen, Douady, 2011). Cet indicateur qualifie la vision de l'ensemble du réseau sur chaque voie : est-elle facilement ou difficilement accessible ? Il apporte une information complémentaire à la *betweenness* – la comparaison a été faite dans (Lagesse, Bordin et Douady, 2015) où l'*accessibilité* portait le nom de *structuralité*.

L'*accessibilité* est donnée pour chaque voie - dans le graphe G -, successivement placée en tant que voie de référence v_{ref} , par la somme des produits de la distance la plus simple d_{simple} de chaque autre voie v par rapport à v_{ref} et de sa longueur *longueur* (v).

$$accessibilite(v_{ref}) = \frac{1}{\sum_{v \in G} [d_{simple}(v, v_{ref}) * longueur(v)]}$$

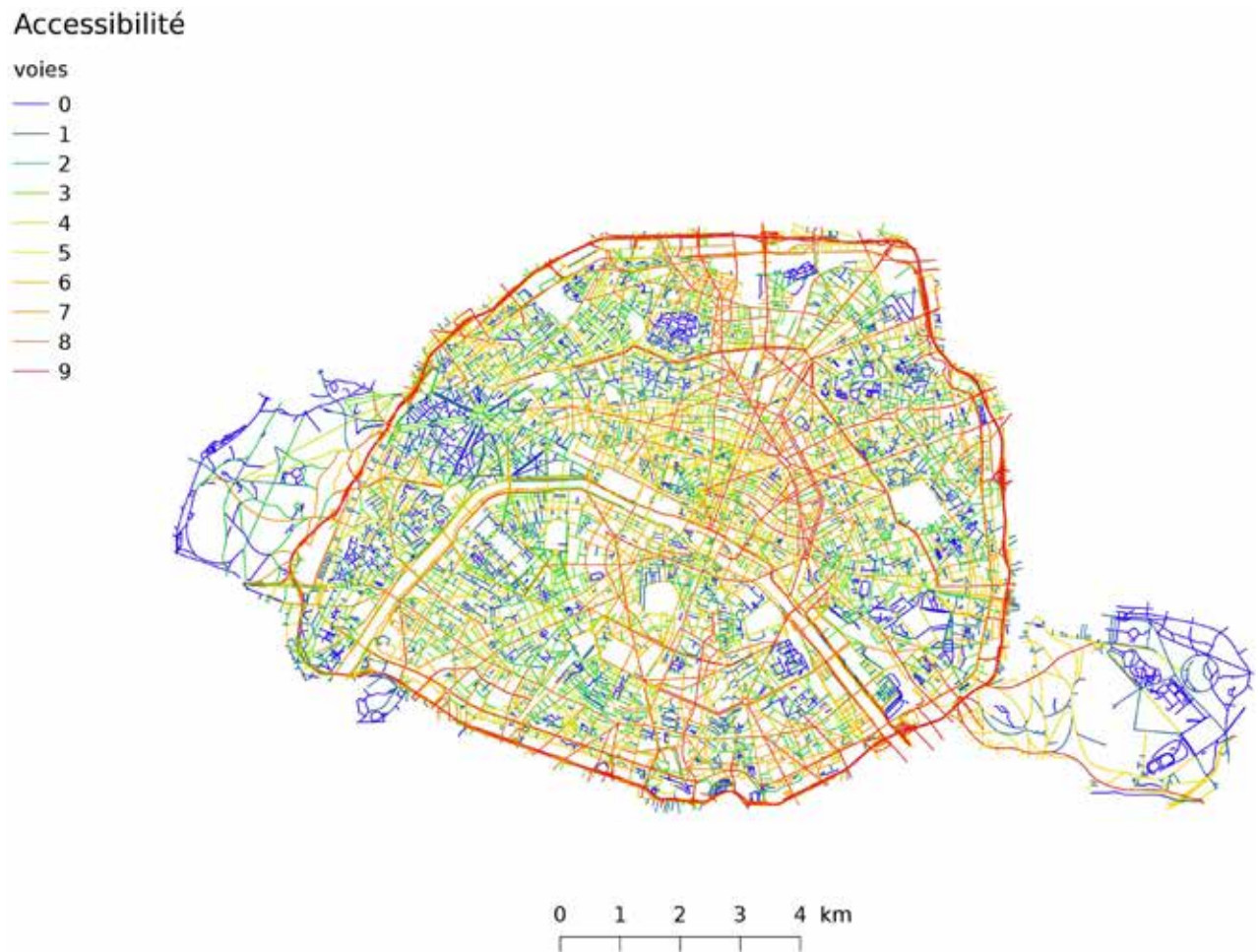
En hiérarchisant les voies, cet indicateur fait apparaître une structure corrélée à la dynamique de développement de la ville. Cette propriété, liée à la dynamique de construction de l'espace (Courtat, Gloaguen, Douady, 2011 ; Lagesse,

2015), se vérifie sur l'ensemble des espaces organiques étudiés, qu'il s'agisse d'un réseau urbain dense (comme Paris : voir Figure 10), d'un réseau urbain mixte (ville provinciale et sa banlieue, comme Avignon dans le Sud de la France) ou d'un réseau à structure arborescente (comme Manaus au Brésil). En effet, les voies dont l'indicateur d'*accessibilité* est le plus fort minimisent le nombre de changement de voies pour accéder à l'ensemble du réseau. En confrontant cette analyse mathématique au savoir des urbanistes et anthropologues, nous observons que cet indicateur fait ressortir les objets au

cœur des déplacements dans la ville, qui correspondent souvent au squelette de son développement.

L'application de l'indicateur d'*accessibilité* à la voie le rend robuste au découpage du réseau : la hiérarchie établie entre les objets varie très peu selon le découpage de l'échantillon. Nous illustrons cela à travers deux découpages de la ville de Paris, en considérant la différence entre les valeurs de cet indicateur pondérée par l'impact des arcs retirés (Figure 11). L'étude de robustesse au découpage spatial de cet indicateur est détaillée dans (Lagesse, 2015).

Figure 10. Accessibilité des voies calculée sur le réseau viaire de la commune de Paris



Les résultats sont classés par ordre croissant dans 10 classes qui regroupent chacune un dixième de la longueur totale du réseau. Ainsi les voies étant les plus accessibles appartiennent à la classe 9 et sont représentées en rouge.

Réalisation : Claire Lagesse

Figure 11. Impact de l'ajout de la partie grise sur le calcul de l'accessibilité sur la partie centrale

Impact de l'effet de bord

appariement [12043]

- -1 - -0.1 [4]
- -0.1 - -0.01 [35]
- -0.01 - -0.001 [14]
- -0.001 - -0.0001 [1]
- 0.0001 - 0.001 [5]
- 0.001 - 0.01 [8951]
- 0.01 - 0.1 [2938]
- 0.1 - 1 [91]
- addition



La variation est homogène : pour 11 948 des 12 043 voies considérées (99,2 % de l'échantillon), elle est de moins de 10 % ; et pour 8975 voies (74,5 % de l'échantillon) de moins de 1 %. Les plus grandes variations concernent l'extrême pourtour de l'échantillon. L'impact, même s'il est très faible, va majoritairement vers une amélioration de l'accessibilité pour la partie centrale.

Réalisation : Claire Lagesse

CONCLUSION

Nous avons retracé dans cette étude l'importance de l'analyse de la continuité et de l'alignement dans les graphes spatiaux, notamment pour la caractérisation du réseau viaire. Nous approfondissons cette réflexion en construisant un objet complexe : la *voie*. Construite localement, à chaque sommet, elle est indépendante du sens de lecture du graphe. C'est un objet aux multiples échelles qui permet une lecture globale approfondie du réseau à travers le développement d'indicateurs. Elle

est également garante de la robustesse spatiale de la lecture (stabilité selon le découpage de l'échantillon).

La méthodologie permettant la construction d'un objet robuste (aussi bien à l'acquisition des données qu'à leur utilisation) a été spécifiquement travaillée pour offrir à un public pluridisciplinaire la possibilité de se saisir de la voie et d'en faire un élément de référence dans chaque domaine. Nous reconstruisons de manière objective un objet qui, dans une ville, est fondé sur un sentiment de continuité, de perspective.

Sa structure participe aux stratégies de déplacement des utilisateurs du réseau (Pailhous, 1970 ; Hillier, Hanson, 1984 ; Xie, Levinson, 2007 ; Degouys, à paraître). L'hypothèse sous-jacente est forte : elle suppose qu'un réseau spatialisé porte dans son inscription au sein de l'espace et dans sa topologie des informations liées à sa croissance et à son utilisation. Nous tentons de comprendre dans nos travaux jusqu'où il est possible de suivre cette idée. Il reste encore beaucoup de questions en suspens qui promettent de vastes champs de recherches pluridisciplinaires.

Claire Lagesse est géomaticienne, maître de conférences à l'Université Bourgogne Franche-Comté (ThéMA UMR 6049, CNRS). Elle est ingénieure, diplômée de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), docteure en physique, diplômée de l'Université Paris-Diderot, Sorbonne Paris Cité. Sa thèse « Lire les lignes de la ville, Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux », soutenue en septembre 2015, propose une méthodologie de lecture de graphes, appliquée à l'analyse urbaine. Ses recherches portent sur les structures et les dynamiques de croissance des réseaux complexes spatiaux, notamment viaires. claire.lagesse@univ-fcomte.fr

Patricia Bordin, Docteure en sciences de l'information géographique, est chercheuse associée à l'Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Institut des Énergies de Demain (IED), à l'Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP (École supérieure des travaux publics), Cachan et à L'EIVP

(École des ingénieurs de la ville de Paris. Elle travaille en recherche sur la modélisation des informations géographiques et contribue à leurs études et observations. Ses recherches portent en particulier sur l'intégration de la dimension temporelle et sur l'analyse des données de réseaux de distribution. Après avoir dirigé le Laboratoire de Géomatique Appliquée de l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière), elle a créé GéoSpective, pour développer et valoriser de nouveaux projets de recherche. patricia.bordin@geospective.fr

Stéphane Douady est Physicien, Directeur de Recherche au CNRS, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Matière et Systèmes Complexes (MSC). Il s'intéresse à la morphogenèse sous toutes ses formes et dans diverses disciplines : dunes en Géo-Physique, spirales de pommes de pin, formes et veines des feuilles en Botanique, poumons en Biologie, et enfin rues des villes en Sociologie-Urbanisme. Il a reçu la médaille de bronze du CNRS en 1991 puis celle d'argent en 2005. stephane.douady@univ-paris-diderot.fr

Philippe Bonnin est architecte DPLG (1972), anthropologue, directeur de recherches au CNRS, Directeur du laboratoire AUS (Architecture, Urbanisme, Société) - UMR CNRS LAVUE 7218 Université Paris 8, et fondateur du réseau JAPARCHI. Il est l'auteur de nombreux ouvrages et articles sur l'architecture, l'habitat rural autant qu'urbain, sur l'espace quotidien du Japon comme de la France. Il a co-dirigé la publication du Vocabulaire de la spatialité japonaise (2014, éditions CNRS), qui a reçu le grand prix de l'Académie d'Architecture. Philippe.bonnin@me.com

NOTES

(1) 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 Philippe Bonnin (CNRS-AUS-LAVUE) et Stéphane 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-doc) et Wang Xi (doctorante).

(2) Nous notons que, dans le cas des graphes routiers, le graphe créé n'est pas forcément planaire. En effet, un pont urbain (deux rues qui se croisent à des altitudes différentes : un échangeur autoroutier par exemple) ne donnera pas lieu à la création d'une intersection, et donc ne sera pas formalisé par un sommet. Si nous considérons d'autres types de graphes spatiaux comme celui des veinures de feuille ou de craquelures dans de l'argile, en revanche, le graphe considéré sera bien planaire.

(3) Pour calculer l'angle entre deux arcs, nous ne considérons que le segment de cet arc lié au sommet considéré

(segment situé entre le sommet et le premier point annexe de l'arc).

(4) *Connectivité* est un néologisme, traduit de l'anglais, correspondant à la notion de connexité en langue française, mais que nous adoptons ici pour dénommer spécifiquement l'indicateur que nous créons.

(5) L'importante corrélation entre la forte connectivité et l'importance historique de ces voies a été bien remarquée par les membres de notre équipe, mais la démonstration rigoureuse de cette corrélation reste à établir.

(6) Le terme *d'accessibilité* que nous avons adopté pour désigner cet indicateur, et la propriété qu'il mesure, est certes imparfait et fait suite aux termes de *centralité*, et de *structuralité* que nous avons adoptés précédemment, qui induisaient en erreur quoiqu'ils soulignaient aussi une partie de cette propriété : le fait qu'à partir de la voie considérée on ait le moins de voies différentes à emprunter pour joindre la totalité des autres voies (elle se trouve donc en position *centrale* selon ce critère, et joue un rôle *structurel* important pour le réseau dans son ensemble). Réciproquement, cette voie est la plus facilement *accessible* à partir de toutes les autres.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERT R., JEONG H., BARABÁSI A.-L., 1999, Internet : Diameter of the world-wide web, *Nature*, 401(6749), p. 130-131.
- BARABÁSI A.-L., FRANGOS J., 2002, *Linked : the new science of networks science of networks*, New-York: Basic Books,.
- BARABÁSI B. A.-L., BONABEAU E., 2003, Scale-free, *Scientific American*, 288.5 (2003), p. 50-59.
- BARTHELEMY M., 2011, Spatial networks, *Physics Reports*, 499, p. 1-101.
- BARTHELEMY M., BORDIN P., BERESTYCKI H., GRIBAUDI M., 2013, Self- Organization Versus Top-down Planning in the Evolution of a City, *Scientific Reports* 3, Article number 2153. DOI:10.1038/srep02153
- BAVELAS A., 1948, A mathematical model for group structures *Human organization*, 7(3), p. 16-30.
- BAVELAS A., 1950, Communication patterns in task-oriented groups. *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 725-730.
- BEAUCHAMP M. A., 1965, An improved index of centrality, *Behavioral Science*, 10(2), p. 161-163.
- BONNIN Ph., DOUADY S., 2013, Distance et temps dans la morphogenèse du réseau des rues. Les réseaux dans le temps et dans l'espace, in: Beauguette L. (coord.), *Actes de la deuxième journée d'étude du groupe fm*, Paris, 19 septembre 2103, p. 47-73.
- CARDILLO A., SCCELLATO S., LATORA V., PORTA S., 2006, Structural properties of planar graphs of urban street patterns, *Physical Review E*, 73(6) : 066107. DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.73.066107
- COHN B. S., MARRIOTT M., 1958, Networks and centres of integration in indian civilization, *Journal of social Research*, 1(1), p. 1-9.
- COURTAT T., GLOAGUEN C., DOUADY S., 2011, Mathematics and morphogenesis of cities : A geometrical approach, *Physical Review E*, 83(3) : 036106. DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.83.036106
- COURTAT T., 2012, *Walk on City Maps-Mathematical and Physical phenomenology of the City, a Geometrical approach*, Doctoral dissertation, Université Paris-Diderot-Paris VII.
- CRUCITI P., LATORA V., PORTA S., 2006, Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3) : 036125. DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125
- DALTON R. C., 2001, The Secret Is to Follow Your Nose, *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium*, Georgia Institute of Technology Atlanta May 7-11 2001, Vol. 47. [En ligne] (consulté le 29 août 2016) Disponible à l'adresse : http://www.ucl.ac.uk/bartlett/3sss/papers_pdf/47_conroy.pdf
- DEGOUS E., (à paraître), Itinéraires piétons et forme des villes. Stratégies d'usage et caractérisation du réseau viaire en milieu urbain, in: Bonzani S. et Guez A. (dir.), *Représenter la transformation. Ou comment saisir les espaces-temps habités*.
- DILL J., 2004, Measuring network connectivity for bicycling and walking, *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, DC, p. 11-15.

- FOLTÊTE J.-C., GENRE-GRANDPIERRE C., HOUOT H., FLITTI M., 2002, Structures urbaines, offres de transport et comportement de mobilité, *Colloque de l'ACI. Quatre ans de recherche urbaine 2001-2004*, 2004, Paris, France. pp.450-454, 2006. <hal-00762415>.
- FREEMAN L. C., 1977, A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, p. 35-41.
- GARRISON W. L., 1960, Connectivity of the interstate highway system, *Papers in Regional Science*, 6(1), p. 121-137.
- GARRISON W. L., MARBLE D. F., 1962, *The structure of transportation networks*, No. TR62 11, Evanston, Ill.: Northwestern Univ.
- GENRE-GRANDPIERRE C., 2002, La structure topologique et fonctionnelle des réseaux routiers urbains comme déterminant de la géographie des flux de déplacements, In: Groupe Dupont - Université d'Avignon, *L'explication en Géographie, Géopoint 2000, 29-30 mai 2000*, Avignon : Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, p. 61-67.
- GENRE-GRANDPIERRE C., FOLTÊTE J.-C., 2003, Morphologie urbaine et mobilité en marche, *Cybergeog : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, 3ème colloque du Groupe de Travail Mobilités spatiales et fluidité sociale (GT23) : Offre urbaine et expériences de la mobilité, Strasbourg, France 20-21 et 22 mars 2003. Articles sélectionnés par Cybergeog, document 248, mis en ligne le 7 octobre 2003, consulté le 8 juillet 2016. DOI: 10.4000/cybergeog.3925
- HAGGETT P., CHORLEY R. J., 1969, *Network analysis in geography*, volume 67, Edward Arnold London.
- HILLIER B., LEAMAN A., STANSALL P., BEDFORD M., 1976, Space syntax, *Environment and Planning B - Planning and Design*, 3(2), p. 147-185.
- HILLIER B., HANSON J., 1984, *The Social Logic of Space*, Cambridge: Cambridge University Press.
- HILLIER B., PENN A., HANSON J., GRAJEWSKI T., XU J., 1993, Natural movement-or, configuration and attraction in urban pedestrian movement, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 20(1), p. 29-66.
- HILLIER B., 1999, Centrality as a process: accounting for attraction inequalities in deformed grids, *Urban Design International*, 4(3-4), p. 107-127.
- HILLIER B., LIDA S., 2005, Network and psychological effects in urban movement, In: Cohn A. G., Mark D. M. (Eds.), *Spatial Information Theory. International Conference, COSIT 2005, Ellcottville, NY, USA, September 14-18, 2005. Proceedings*, Springer Berlin Heidelberg, p. 475-490.
- HILLIER B., 2006, Studying Cities to Learn about Minds: How Geometric Intuitions Shape Urban Space and Make It Work, in: Hölscher C., Dalton R. C., Turner A. (Eds.): *Space Syntax and Spatial Cognition – Proceedings of the Workshop held in Bremen, 24th September 2006*, Bremen: Universität Bremen, p. 11-32. [On line] (accessed 29 August 2016) Available at: http://www.sfbtr8.uni-bremen.de/papers/Space_allen.pdf
- HILLIER B., VAUGHAN L., 2007, The city as one thing, *Progress in Planning*, 67(3), p. 205-230.
- HILLIER B., 2009, Spatial sustainability in cities: organic patterns and sustainable forms, in: Koch D., Marcus L., Steen J. (eds.), *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*, Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), (pp. p. 1). [On line] (accessed 29 August 2016) Available at: <http://discovery.ucl.ac.uk/18538/1/18538.pdf>
- HUARD M., 2013, *Atlas Historique de Paris*, [En ligne] (consulté le 8 juillet 2016) Disponible à l'adresse : <http://paris-atlas-historique.fr>
- JIANG B., CLARAMUNT C., 2004, Topological analysis of urban street networks, *Environment and Planning B - Planning & Design*, 31, p. 151-162.
- KANSKY K. J., 1963, *Structure of transportation networks : relationships between network geometry and regional characteristics*, Chicago: University of Chicago.
- LAGESSE C., BORDIN P., DOUADY S., 2015, A spatial multi-scale object to analyze road networks, *Network Science*, 3(01), p. 156-181.
- LAGESSE C., 2015, *Lire les lignes de la ville. Méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux*, Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot-Sorbonne-Paris Cité.
- MARCHAND B., 1974, Pedestrian Traffic Planning and the Perception of the Urban Environment : A French Example, *Environment and Planning A*, 6, p. 491-507.
- NEWELL G. F., 1980, *Traffic flow on transportation networks*, Cambridge, Mass.: MIT Press.
- NEWMAN M. E., 2003, The structure and function of complex networks, *SIAM review*, 45(2), p. 167-256.
- PAILHOUX J., 1970, *Représentation de l'espace urbain et cheminements : l'exemple du chauffeur de taxi*, Paris : Presses Universitaires de France.
- PENN A., 2003, Spatial Syntax and Spatial Cognition or Why the Axial Line ?, *Environment and Behavior* 35, p. 30-65.
- PORTA S., CRUCITI P., LATORA V., 2006, The Network Analysis of Urban Streets: a Dual Approach, *Physical A - Statistical Mechanics and Its Applications*, 369, p. 853-866.
- RODRIGUE J.-P., COMTOIS C., SLACK B., 2004, *Transport geography on the web*, Dept. of Economics & Geography, New York: Hofstra University.
- SABIDUSSI G., 1966, The centrality index of a graph, *Psychometrika*, 31(4), p. 581-603.
- SCELLATO S., CARDILLO A., LATORA V., PORTA S., 2006, The backbone of a city, *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 50(1), p. 221-225.
- SHIMBEL A., 1953, Structural parameters of communication networks, *The bulletin of mathematical biophysics*, 15(4), p. 501-507.
- TAAFFE E. J., GAUTHIER H. L., O'KELLY M. E., 1996, *Geography of transportation*, (second edition), Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- TAYLOR G. D., HARIT S., ENGLISH J. R., WHICKER G., 1995, Hub and spoke networks in truckload trucking: Configuration and operational concerns, *Logistics and Transportation Review*, volume 31, p. 209-237.
- TURNER A., 2001, Angular Analysis, in: *Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium*, Atlanta. Vol. 30.
- VAUGHAN R., 1987, *Urban spatial traffic patterns*, London: Pion Limited.
- VIANA M. P., STRANO E., BORDIN P., BARTHELEMY M., 2013, The simplicity of planar networks, *Scientific reports*, 3, Article number 3495. Doi:10.1038/srep03495.
- XIE F., LEVINSON D., 2007, Measuring the structure of road networks, *Geographical analysis*, 39(3), p. 336-356.