

Construction d'un modèle pour l'analyse et l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport

Eric Mermet

Laboratoire COGIT, IGN
73, Avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé
eric.mermet@ign.fr

MOTS - CLÉS

Réseau de transport
Indicateurs de réseaux
Analyse structurelle des réseaux
Représentation et Exploration
Langage graphique

RÉSUMÉ

Un réseau de transport est un système permettant de relier des lieux sur un territoire. Ces lieux sont mis en relation par des chemins dont la modalité est variable : plus court chemins, chemins de contournement, etc. Or, dans le contexte de l'analyse de la structure des réseaux, il est nécessaire d'appréhender tous les chemins possibles et leurs différentes modalités, en cartographiant des indicateurs relationnels. La problématique d'une telle approche implique à la fois une grande masse de données à stocker et analyser, et la mise en évidence et l'extraction d'informations. Dans ce cadre, cet article propose un modèle pour l'analyse et l'exploration des propriétés structurelles d'un réseau de transport. Ce modèle est basé sur quatre leviers : un espace de calcul contenant toutes les Origines-Destinations, une mesure quantifiant une propriété par une formule mathématique, une vue permettant la variation du niveau de détails par agrégation de zones et enfin une légende permettant d'apprécier les résultats en opérant des variations de couleur, du nombre de classes et du type de découpage de valeurs.

KEY WORDS

Transportation network
Networks indicators
Structural analysis of networks
Representation and Exploration
Graphical language

ABSTRACT

Construction of a model for analysis and exploration of networks transportation

A transportation network allows to connect different places on the territory. These places are linked by paths which modality can be variable: shortest paths, bypass paths, etc. In the context of the analysis of the network structure, it is useful to take into account all possible paths and their different modalities, by mapping relational indicators. The problematic of such an approach is based both on a huge mass of data to store and analyze, and the bringing out and extracting of information. In this context, this article suggests a model for analysis and exploration of the structural properties of a transportation network. This model is based on four basics: a calculation space containing all the Departures-Arrivals, a measure quantifying a property by an algebra formula, a view allowing the fluctuation of details level by aggregation of zones and finally a legend allowing the understanding of the results by varying colours, class number and the sort of cutting values.

1. Introduction

Un réseau de transport repose sur la trame d'un système spatial dont le rôle est de mettre en relation des lieux sur un territoire. Il est le support sur lequel s'inscrivent les déplacements de personnes et de marchandises. Il permet également le développement d'activités économiques. Il est le porteur de plans d'urbanisation et d'aménagement de l'espace public (Dupuy, 1991). Un tel système est complexe à analyser car il combine à la fois des propriétés fonctionnelles et structurelles qu'il n'est pas facile de différencier. De plus, les études habituelles de réseaux s'appuient sur des indicateurs qui sont issues de la combinaison de ces deux aspects : fonctionnel et structurel. Il est alors intéressant de créer des outils les dissociant pour faire la part entre le rôle que tient le réseau dans l'organisation fonctionnelle des déplacements de personnes ou de marchandises, et les propriétés structurelles intrinsèques du réseau au travers de la capacité du réseau à mettre des lieux en relation. C'est pourquoi pour faire face à cela, nous proposons dans cet article de présenter un cadre pour l'exploration des propriétés structurelles des réseaux de transport. Ce travail préparatoire est un premier pas dans la mise au point d'un outil logiciel d'analyse des graphes géographiques.

L'exploration de réseaux a émergé face aux problématiques diverses liées à la fois à la combinatoire des réseaux et leur visualisation. Ces informations sont souvent difficiles à appréhender. Un utilisateur voulant comprendre l'organisation des différentes possibilités relationnelles d'un réseau se heurte à différents problèmes : l'extraction et la fouille de l'information, et la mise en valeur des données. Pour extraire ces informations et les transformer en connaissances, il est nécessaire d'effectuer des requêtes sur le réseau. Cette interrogation n'est possible qu'en ayant au préalable défini les besoins relatifs à l'exploration nous permettant de créer un modèle pour l'analyse et l'exploration des propriétés d'un réseau. L'outil logiciel résultant de ce modèle aura pour principal objectif d'explorer et de visualiser les propriétés connectives d'un réseau de transport.

Ainsi, dans un premier temps, nous nous attachons à décrire la problématique sous-jacente à l'analyse et l'exploration de réseaux. Cette problématique sera corroborée dans une seconde partie, dans laquelle nous montrons par le biais d'une analyse manuelle d'un réseau, les difficultés de mise en œuvre d'une telle approche. Cette partie nous amènera à dégager les quatre notions clés nécessaires à l'exploration de réseau. Ensuite, à partir de ces notions, nous présentons le modèle dédié à l'exploration des

réseaux. Pour finir, nous présenterons l'utilisation que l'on pourra faire du modèle dans le cadre d'une exploration assistée ainsi que les perspectives d'un tel modèle dans le cas d'autres types de réseaux.

1.1. Les approches thématiques

Les réseaux de transport en géographie sont étudiés sous un aspect thématique. La littérature sur ces études est assez abondante et aborde des sujets sur des thématiques comme les migrations pendulaires, des analyses de mobilité au sein d'une agglomération, des études de flux de passagers, etc. Ces études se basent sur des outils de modélisation des phénomènes au niveau micro ou au niveau macro.

Ainsi, Mathis (2008) ou Arentze et Timmermans (2005) modélisent très finement les ménages et leurs agendas quotidiens à base de système multi-agents et étudient les impacts sur le réseau. Des modèles mis en œuvre par le biais d'application comme UrbanSim permettent également de comprendre le choix résidentiel d'un ménage en regard de l'accessibilité modale liée au réseau (Balmer, 2008).

Les systèmes multi-agents ont pris ces dernières années un essor important en modélisation micro en géographie quantitative. En effet, on trouve actuellement beaucoup d'outils très complets, simples d'accès (comme MATSIM, librairie Open-Source) permettant de modéliser rapidement un réseau, ou encore le projet SIMPop qui permet d'étudier l'évolution d'un système de ville en réseau (Bretagnolle et Pumain, 2005). En conséquence, la modélisation fine, lorsqu'elle est considérée dans son ensemble et à un niveau plus général, va permettre la compréhension d'un phénomène avec une précision plus grande.

Outre les systèmes multi-agents, il existe également des études macros qui utilisent des outils mêlant à la fois des propriétés intrinsèques du réseau et des propriétés thématiques. Le CETE-Méditerranée développe actuellement une suite logicielle open source POTIMART dédiée à la modélisation de réseaux de transport de personnes et de recherche multimodale d'itinéraires, projet initié par un ensemble d'industriels (Schettini *et al.*, 2007). Toujours dans ce contexte d'études macroscopiques, on trouve par exemple des travaux sur des scénarios possibles d'aménagement du territoire quant à la localisation d'une nouvelle gare TGV et l'évaluation spatio-temporelle d'un tel changement (Chapelon *et al.*, 2003).

Les études citées plus haut combinent un aspect fonctionnel et thématique à un aspect inhérent à la structure du réseau. Or, avant de considérer les

problématiques thématiques, il peut être intéressant d'étudier le réseau de transport sous un angle a priori et générique en se limitant aux aspects structurels. Cette approche permet ainsi de faire le tri dans les propriétés impliquées. Prenons l'exemple d'un indicateur d'accessibilité aux soins dans une ville (Berger, 2008). Cette mesure combine à la fois la distribution spatiale des centres médicaux (fonctionnelle et exogène à la structure du réseau) et l'offre en déplacement sur le réseau (intrinsèque à la structure du réseau).

Ces exemples montrent bien qu'il est nécessaire de comprendre comment et dans quelle mesure la trame du réseau et ses propriétés intrinsèques jouent un rôle dans l'explication d'un phénomène.

Un indicateur de ce type ne permet pas de discerner le rôle du réseau des facteurs thématiques dans l'explication du phénomène étudié. En effet, pour la compréhension de phénomènes complexes, il est nécessaire de les décomposer en phénomènes simples (Joliveau, 2006). Notre approche de découpage fonctionnel/structurel nous permet de se libérer des aspects thématiques et d'étudier uniquement la contribution du réseau. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier par une approche structurelle en quoi les réseaux prédisposent à des phénomènes. Cette dernière, déjà entreprise par Gleyze (2005), consiste à analyser la trame et l'arrangement des composantes au sein du réseau et les potentialités qui en découlent. Ces potentialités intrinsèques sont produites par les chemins que le réseau offre pour mettre en relation des lieux sur le territoire compte tenu de sa topologie, sa métrique et sa géométrie. Ainsi, en mettant en évidence les facultés décrites, nous pouvons comprendre les parts structurelles et fonctionnelles intervenant dans l'explication d'un phénomène intervenant sur un réseau.

1.2. L'approche structurelle

Les réseaux sont utilisés comme outil de modélisation de phénomènes complexes dans de nombreux domaines dont la problématique commune est d'étudier la mise en relation d'objets à des fins d'échanges: en biologie au travers de réseaux de neurones, de réseaux métaboliques (Jeong *et al.*, 2000) ou de réseaux trophiques (Williams et Martinez, 2000), en linguistique dans les réseaux de cooccurrences (Ferrer et Solé, 2001), ou les réseaux de dictionnaires (Blondel et Senellart, 2002) ou encore en informatique dans l'échange d'informations entre machines distantes via l'Internet. Parmi cette bibliographie non-exhaustive de quelques domaines concernés utilisant des réseaux, nous pouvons distinguer une typologie de deux classes de réseaux :

- les réseaux immatériels ont généralement des nœuds aux lisibilités arbitraires ainsi que des liaisons entre ces nœuds non tangibles (les réseaux sociaux étudiés par Wasserman et Faust (1994), les réseaux d'entreprises (Rozenblat *et al.*, 2007), les réseaux trophiques, etc.). Ce sont des représentations graphiques de modélisation permettant d'appréhender un phénomène.

- les réseaux d'infrastructures possèdent quant à eux des nœuds géoréférencés et ancrés dans l'espace, reliés entre eux par des liens matériels ; tous les réseaux d'infrastructures font partie de cette classe: les réseaux de transports, les réseaux électriques, les réseaux informatiques, les réseaux de télécommunications, etc.

C'est à ce dernier type de réseau que nous nous intéressons particulièrement. La théorie des graphes (Berge, 1973) nous permet de modéliser mathématiquement les réseaux :

$$G = (V, E, \alpha, \beta)$$

Un graphe G est une paire ordonnée de deux ensembles (V, E) disjoints :

- V est l'ensemble des nœuds et où $n = \text{card}(V)$
- E est l'ensemble des arêtes correspondant à des paires non orientées de V^2 et où $m = \text{card}(E)$
- α est une fonction de coût sur les nœuds
- β est une fonction de coût sur les arêtes

Ainsi, dans un graphe G contenant des nœuds V et des arcs E , on ne considère uniquement les relations que les nœuds entretiennent entre eux (la topologie) (figure 1).

Un réseau R , quant à lui comporte en plus de la topologie, la position des nœuds au sein de l'espace, les métriques¹ associées aux nœuds et aux arcs, c'est à dire tout ce qui concerne le système de mesure sur le réseau (pondération des nœuds et valuation des arêtes) et enfin l'ensemble des relations possibles entre tous les nœuds du réseau (l'ensemble Origine-Destination).

On définit alors les éléments d'un réseau $R = \{\text{Topologie, Géométrie, Métrique, Relations OD}\}$

Le rôle d'un réseau est de mettre des lieux en relation. Si l'on considère qu'il existe toujours un chemin pour joindre deux nœuds dans un maillage de n nœuds, alors il existe $n(n-1)/2$ relations possibles. Nous appelons cet ensemble l'espace des relations OD du réseau, à noter ici que nous emploierons par la suite le terme espace au sens mathématique, c'est à dire l'ensemble $V \times V$ de nœuds.

¹ Métrique : théorie de la mesure dans un espace, ici les composantes structurelles du réseau (Petit Robert, 2007)

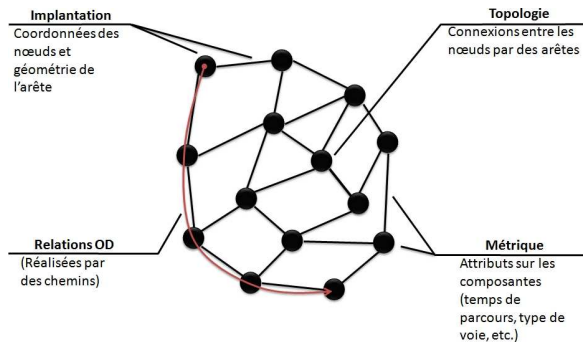


Figure 1. Modélisation d'un réseau

Dans notre approche, l'analyse structurelle de réseaux repose sur les différents moyens de relier une Origine et une Destination : le mode de cheminement emprunté par un usager du réseau pour se rendre d'un endroit à un autre. Il en existe différentes classes (figure 2) :

- naturellement, on pense au plus court chemin pour joindre deux lieux. Ce cheminement est la façon optimale de joindre deux lieux sur le réseau.
- dans le cadre d'études de risques dans lesquelles des composantes du réseau (nœuds et/ou arcs) peuvent être endommagées, on considère des chemins de contournement de ces dernières. Un tel chemin est en fait le plus court chemin sur le réseau privé des composantes cassées. On peut donc le qualifier de plus court chemin dégradé.
- des chemins alternatifs peuvent être intéressants si l'on ne veut pas raisonner en plus court chemin. Il est rare que les utilisateurs d'un réseau connaissent tous le plus court chemin pour aller d'un point à un autre. Il faut donc envisager d'autres types de comportements comme le second plus court chemin, des chemins eulériens ou hamiltoniens.

- les chemins (ou marches) aléatoires peuvent modéliser un utilisateur perdu dans le réseau et qui prendrait à chaque embranchement une direction totalement aléatoire. Cette classe de chemin peut permettre la détection de communauté ou des zones de forte densité (Pons, 2007).

- un utilisateur peut définir son propre chemin passant par des points d'intérêt du réseau. Ces chemins définis par l'utilisateur sont intéressants pour étudier des comportements particuliers d'usagers sur un réseau et leurs effets.

Il est possible d'analyser un réseau avec différents outils mathématiques. On trouve dans la littérature des indicateurs purement topologiques issus de la théorie des graphes (Berge, 1973 ; Bollobas, 1998) permettant d'avoir une première idée sur la nature du réseau. Mais comme le montrent Beguin et Thomas (1997), ces indicateurs ne sont pas assez

pertinents pour caractériser avec certitude un réseau.

Pour cette raison, nous optons pour l'analyse des réseaux à partir des chemins sur le réseau. En effet, c'est l'offre en déplacement sur le réseau qui va révéler les propriétés structurelles d'un réseau. Or, les différents modes de cheminements décrits plus haut associés à la multitude de chemins existants sur un réseau augmentent la complexité combinatoire liée à une analyse fine de la trame du réseau.

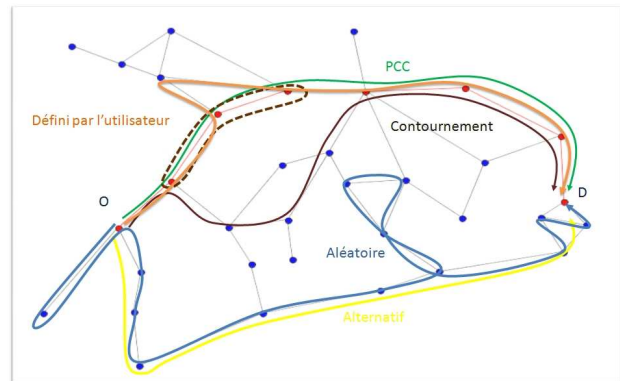


Figure 2. Les différents cheminements sur un réseau

Les mesures sur le réseau que nous utilisons et permettant d'évaluer les différents aspects des possibilités intrinsèques du réseau sont des indicateurs relationnels. De tels indicateurs s'appuient sur les relations OD et les différents modes de cheminements. Parmi les plus utilisés dans les études de réseaux en géographie quantitative, nous en présentons les deux les plus courants :

- l'éloignement moyen représente pour un nœud la distance moyenne à tous les autres nœuds du réseau (figure 3). Il est ensuite aisé de réaliser une moyenne pour tous les nœuds de façon à obtenir un éloignement moyen pour tous les nœuds du réseau.

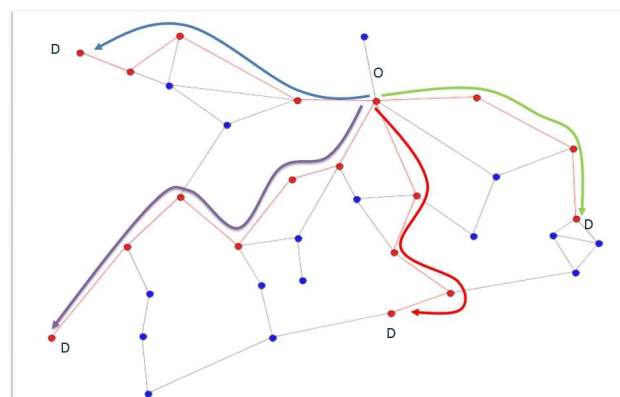


Figure 3. Illustration de l'éloignement moyen pour un nœud

– la centralité intermédiaire mesure la sollicitation d'une composante du réseau (figure 4). Cette sollicitation est fonction du nombre de relation dont les plus courts chemins traversent la composante en question relativement au nombre total de relations OD existantes sur le réseau (Parlebas, 1972).

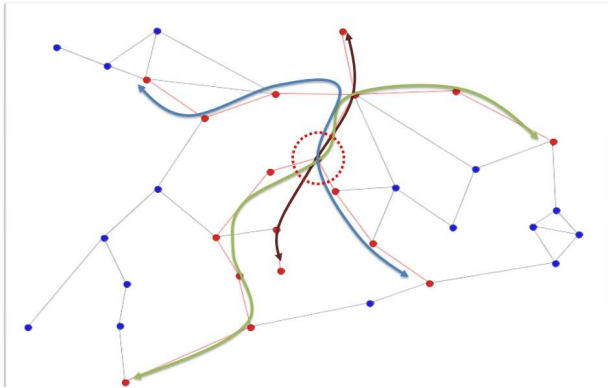


Figure 4. Illustration de la centralité intermédiaire pour un nœud

Nous pouvons bien sûr envisager d'autres indicateurs relationnels que ceux présentés succinctement ici et présentant un intérêt pour l'analyse structurelle des réseaux. Pour exemples, Gutiérrez *et al.* (1998) donne un indicateur d'accessibilité synthétisant l'efficacité du réseau en une valeur par nœud. Cet indicateur permet de mesurer le bénéfice net du réseau en termes d'accessibilité indépendamment de la position spatiale des sommets. D'autres indicateurs structurels de la « Space Syntax » (Hillier *et al.*, 1976) peuvent être intégrés à notre approche. Ils permettent de décrire le réseau en termes de connectivité, de diamètre topologique, de nombre de changements de direction dans la mise en relation de deux lieux chez Read (1997). Ou encore, Karlström et Mattson (2009) introduisent la distance structurelle sur le graphe dual en mettant en place un indicateur d'attraction-accessibilité.

1.3. Problèmes liés au grand nombre d'informations

Nous nous situons ici dans les problèmes classiques de la fouille de données et de la géovisualisation (Dykes *et al.*, 2005). Nous cherchons à transformer les données brutes du réseau en informations exploitables et donc en connaissances par le biais de cartes expérimentales. Ces informations sont contenues en puissance dans le réseau mais sont invisibles sans traitements. En l'occurrence, nous recensons les problèmes suivants :

– une masse importante de données au travers de tous les chemins existants sur le réseau. En effet, il est aisé de constater que d'envisager toutes les relations OD réalisées par des plus courts chemins est un problème classique de combinatoire. Plus le nombre de nœud du réseau est important et plus le nombre de relations OD le sera aussi, fonction de n^2 . Si l'on en vient à considérer tous les autres modes de cheminements possibles, il apparaît clairement qu'il devient difficile pour un utilisateur d'envisager l'ensemble des chemins possibles.

– le stockage des données : le problème décrit plus haut induit des questions sur l'utilisation et l'optimisation de la mémoire.

– la mise en évidence des informations pour l'utilisateur :

- visuellement, il apparaît que dans un réseau assez dense il n'est pas simple de faire le tri des informations dès l'instant où l'on se trouve face à plus d'une centaine de nœuds.

- il n'est pas aisé de choisir des indicateurs pertinents parmi la centaine d'indicateurs réticulaires existants (Chapelon, 1997).

Face à toutes ces difficultés, on comprend qu'un utilisateur aura du mal à mettre en évidence des points particuliers sur un réseau, ou encore de comparer plusieurs de ses configurations possibles.

Il devient alors nécessaire de mettre au point un outil efficace de sélection et de mises en évidence des informations que l'on veut extraire du réseau. Cet outil se veut indépendant de toute plateforme SIG. En s'écartant ainsi des outils classiques, les apports en termes d'exploration sont bien supérieurs puisque dédiés aux réseaux. Le modèle conçu permet, comme nous allons le voir par la suite, de répondre aux problèmes posés supra. L'outil a donc pour objectif de permettre à un utilisateur une exploration visuelle du réseau rapide, souple et interactive.

L'exploration de réseau définie dans cet article a pour objectif de répondre à ces problèmes. Nous définissons l'exploration de réseau comme l'ensemble des méthodes permettant d'apprécier l'organisation structurelle d'un réseau dans l'intention d'exprimer quelque chose d'inconnu ou qui n'est pas visible à première vue.

Pour ce faire, il convient avant tout d'explicitement les besoins d'un utilisateur qui souhaiterait extraire des informations d'un réseau. Nous allons mettre ces points en évidence par le biais d'une exploration manuelle d'un cas d'étude possible mettant en évidence tant les difficultés que les besoins liés à l'exploration de réseau.

2. Analyse des besoins

Cette partie a pour objectif, en simulant une analyse, de montrer le type de requêtes et leurs enchaînements lors de l'exploration d'un réseau. Nous nous proposons d'identifier les besoins d'un utilisateur qui souhaiterait interroger les potentialités d'un réseau au travers d'une étude de cas.

2.1. Analyse manuelle d'un réseau

Le réseau que nous allons considérer dans cette étude (Figure 5) présente les caractéristiques suivantes :

- une rocade ;
- des axes radiaux ;
- un centre-ville dense ;
- quatre ponts traversant le cours d'eau (deux sur la rocade et deux au centre du réseau)

Il comporte délibérément peu de nœuds et d'arcs afin de visualiser facilement dans le cadre de cet article certaines de ses particularités. C'est un réseau bien équilibré avec un $\beta=m/n=1,64$ et une densité d'arêtes $m/m_{max}=5\%$, où m_{max} est le nombre maximum d'arcs possibles, c'est à dire un graphe complètement connecté ;

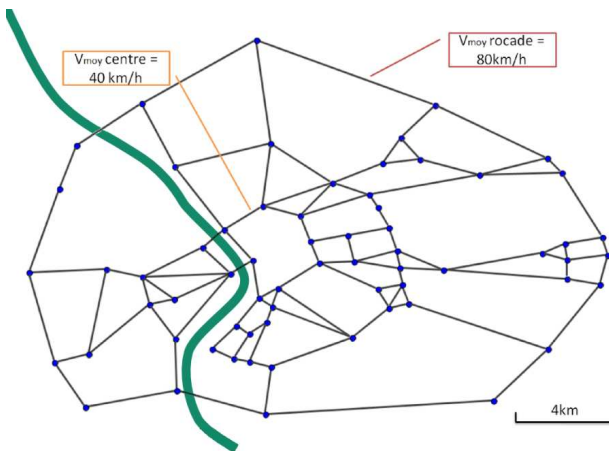


Figure 5. Le réseau d'étude

Notre intention est de souligner certaines propriétés du réseau et d'en appréhender ses forces et ses faiblesses. Nous n'avons aucune connaissance a priori du réseau à part sa géométrie, sa topologie, sa métrique et les chemins existants. Nous considérons les chemins sur le réseau comme optimaux, nous nous appuyerons donc sur la réalisation des relations Origine-Destination par les plus courts chemins.

Nous allons dans un premier temps effectuer une première mesure de centralité intermédiaire. Ne connaissant pas au préalable le résultat de la

mesure, cet indicateur est cartographié avec une légende de quatre caissons dans l'outil logiciel (Figure 6) dont les couleurs sont fixées par défaut dans l'outil logiciel.

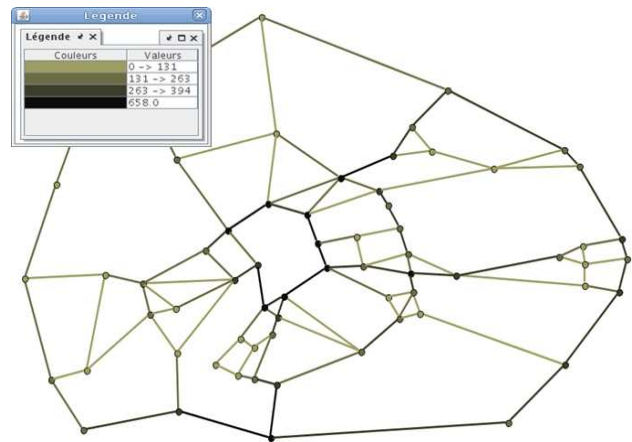


Figure 6. Mesure de centralité avec légende à quatre caissons

Après examen de la carte résultante de cette première mesure de centralité, nous remarquons qu'elle n'est pas assez explicite sur la mise en valeur d'informations. Il nous est alors nécessaire d'effectuer un changement de légende en augmentant le nombre de caissons à six et en choisissant des couleurs mieux adaptées à la visualisation. Cette modification (Figure 7) a deux objectifs. Le premier est visuel puisqu'il permet à l'utilisateur de mieux distinguer et de discriminer les composantes. Le second est d'effectuer par ce biais une première sélection de composantes surchargées par un nombre important de chemins. Nous remarquons en effet que le pont de la rocade sud se voit attribuer une valeur forte.

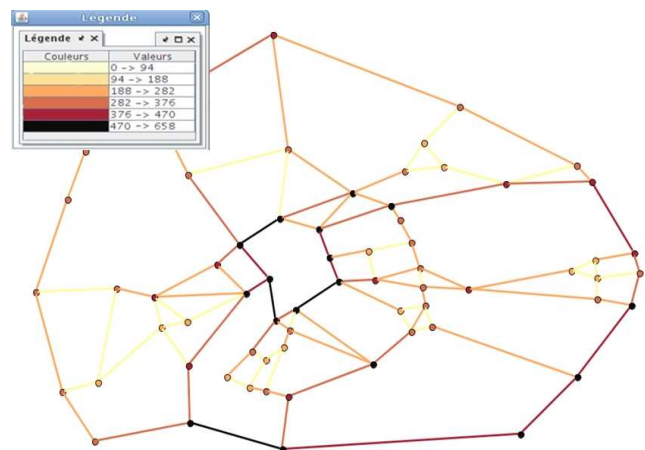


Figure 7. Centralité intermédiaire avec légende à six caissons

Afin de mieux comprendre les dépendances relationnelles mises en jeu au travers de cet arc, il peut être intéressant de cartographier le chevelu (Chapelon, 1997) des chemins transitant par le pont sud (Figure 8). Pour ce faire, il suffit de sélectionner une composante du réseau et d'effectuer une requête sur les chemins transitant par cette composante. Parmi tous ces chemins, plusieurs composantes du réseau vont être activées. Il suffit alors de compter le nombre de fois où elles ont été sollicitées. Ce nombre donne la fréquence de sollicitation d'une composante. Cette représentation donne deux arbres (au sens de la théorie des graphes) qui s'étendent de part et d'autre de la composante sélectionnée.

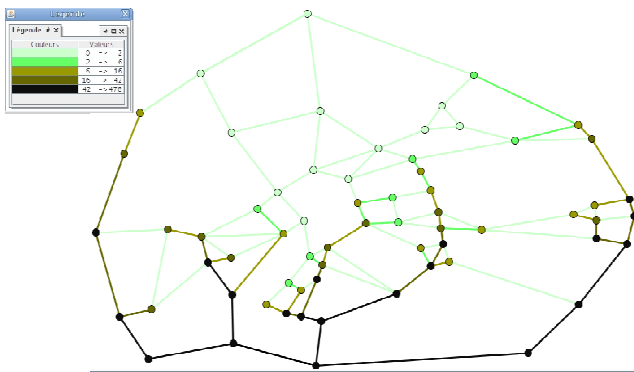


Figure 8. Chevelu des chemins passant par le pont sud

Cette carte nous permet d'observer qu'il se dégage trois zones au sein de la ville lorsqu'il est question de la sollicitation de l'arc de la rocade sud. La première zone se situe au nord de la ville dans laquelle les nœuds ne sont jamais mis en relation via l'arc considéré. Les deux autres zones sont liées aux OD traversant le cours d'eau par l'arc en question. Il est clair que l'espace partitionné ainsi est totalement dépendant de l'arc sélectionné. Mais dans le cas d'une étude sur le désengorgement du pont sud, les espaces mis en jeu sont les zones mises en relation par le biais de ce pont. Ainsi, pour la suite de notre étude de cas, nous allons considérer une zone contenant les nœuds à l'Ouest du cours d'eau et une autre zone comprenant les nœuds à l'Est (Figure 9). Nous effectuons donc ici une sélection d'un nouvel espace OD de calcul pour la suite de l'exploration. Les ODs d'intérêt seront toutes celles dont l'Origine est dans la zone Ouest et la Destination dans la zone Est.

Pour des raisons de simplification visuelle, une agrégation des trois sous-espaces définis plus haut peut être nécessaire (Figure 10). Nous avons choisi de représenter les agrégations par des disques de couleurs tout en gardant en filigrane la trame de base du réseau.

Nous effectuons à la suite de cette agrégation une nouvelle mesure permettant l'évaluation des relations transitant entre ces trois sous-espaces par le biais des quatre ponts.

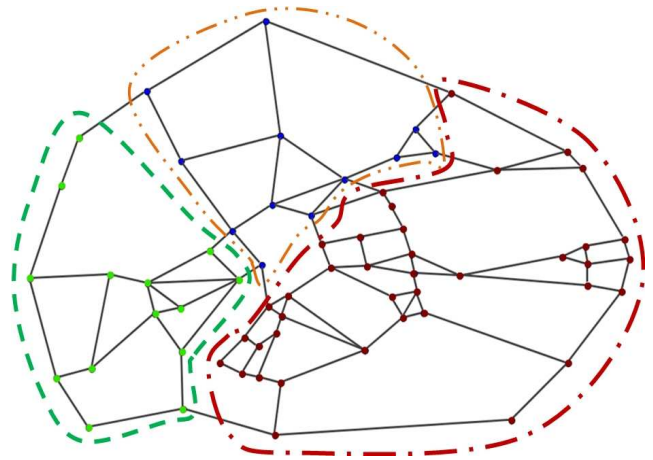


Figure 9. Mise en évidence de trois sous-espaces

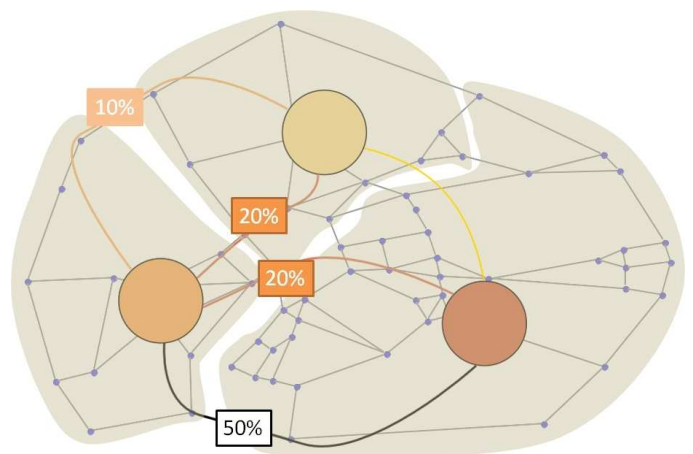


Figure 10. Agrégation et nouvelle mesure de centralité intermédiaire

Nous constatons après cette exploration que les déplacements Ouest-Est au sein de la ville s'articulent à hauteur de 50% autour du pont sud, alors que le pont nord est peu sollicité par des déplacements en chemins optimaux concernant cette classe de relation.

Un gestionnaire de réseau pourra alors envisager de modifier la trame du réseau pour délester le pont par la création d'un autre pont ou encore d'étudier les chemins plus finement et de réfléchir aux différentes possibilités de les détourner par d'autres zones du réseau. Pour effectuer ce test, il va donc falloir modifier la trame du réseau en ajoutant ou retirant des arcs et/ou des nœuds. À la suite de cette modification, une nouvelle exploration est

nécessaire pour mettre en évidence d'éventuels gains ou pertes de sollicitation de composantes.

2.2. Synthèse de l'exploration

Simplement en étudiant la configuration de la trame du réseau, il est possible de dégager des informations intéressantes en se basant sur des données structurales. Nous sommes partis du réseau de base en sélectionnant une composante qui paraissait intéressante car fortement sollicitée. Remarquons que nous aurions pu choisir n'importe quelle autre composante du réseau et l'exploration aurait été totalement différente. Elle l'aurait été également avec un autre utilisateur. Cette étude de cas met en évidence que l'exploration de réseau se fait de manière arborescente sans avoir de conviction certaine sur la suite de l'exploration. Des étapes de l'exploration vont alors se révéler très probablement inutiles.

Au travers de cette étude, nous avons identifié les leviers nécessaires à l'exploration de réseau à travers quatre notions :

- l'espace (de calcul) est constitué un ensemble de relations Origines-Destinations. C'est l'ensemble de définition pour les calculs de mesure. L'utilisateur peut avoir besoin de considérer une portion de l'espace pour appréhender un indicateur sur une composante (accessibilité au départ d'un nœud), sur un ensemble de composante (accessibilité d'une zone) ou la totalité de l'espace pour obtenir une mesure sur la globalité du réseau (accessibilité moyenne).

- la mesure quantifie la propriété d'intérêt par une formule mathématique synthétisant les informations collectées au niveau des relations OD. Un seul indice ne permettra pas de mettre en évidence toutes les propriétés d'un réseau. Il est donc évident de proposer à l'utilisateur une collection assez large d'indicateurs (Chapelon, 1997) afin de décupler les possibilités d'exploration.

- la vue est la représentation graphique du réseau permettant la variation des niveaux de détails par agrégation de nœuds. Il est souvent utile d'observer le fonctionnement interne d'un nœud par des zooms nodaux (Gleyze, 2003) ou à l'inverse de réunir des zones pour simplifier la visualisation et obtenir une mesure agrégée comme montré dans l'étude plus haut.

- la légende permet de mieux apprécier les résultats en opérant des variations du nombre de caissons, des couleurs ou encore la possibilité de considérer des intervalles égaux ou des effectifs égaux. La représentation n'est pas suffisante pour extraire visuellement de l'information. En effet, toute spatialisation d'un phénomène peut faire

l'objet d'un nombre infini de représentations en fonction de la nature intrinsèque du phénomène. Un moyen d'interroger une carte est d'effectuer des variations de la légende (Grasland *et al.*, 2005)

Ces quatre notions combinées entre elles au cours des étapes de l'exploration, nous servent de leviers pour remédier aux problèmes multiples posés par l'analyse exploratoire de réseaux.

3. Le modèle d'exploration de réseau

L'enjeu final de notre travail est de mettre au point un outil logiciel permettant l'exploration souple de réseau. Comme dans toute conception logicielle, la grande difficulté est d'identifier un schéma de données permettant de modéliser toutes les facettes du problème. Ce modèle doit intégrer les différents changements décrits lors de l'étude de cas. Une fois ce modèle conçu, il permettra d'atteindre une souplesse d'utilisation et une ergonomie adaptée à l'exploration de réseau. Il est donc indispensable d'avoir appréhendé tous les besoins liés à l'exploration de réseau.

Après l'identification des besoins, effectuée dans la partie précédente, notre modèle va nous permettre de comprendre comment les quatre notions que sont l'espace, l'indicateur, la vue et la légende vont intervenir dans l'exploration de réseau. En effet, l'analyse préalable a montré qu'il était nécessaire dans une analyse exploratoire de faire interagir ces quatre leviers indépendamment les uns des autres.

Nous définissons une exploration comme une succession de cartes dont le contenu est défini par l'utilisateur en temps réel en fonction de sa réflexion. Une carte est définie par les quatre propriétés mises en évidence plus haut :

- un espace de relations Origine-Destination sur lequel est appliqué une mesure ;

- une mesure appliquée (ou non) sur le réseau étudié que l'on a souhaité au préalable cartographier ;

- une vue est la représentation graphique du réseau ou d'une partie de ses parties permettant l'agrégation de zones du réseau ;

- et enfin la légende de la carte, permettant bien sûr d'explicitier la mesure mais aussi de sélectionner des objets aux valeurs significatives et singulières.

Ce concept est le point focal du modèle puisque c'est l'articulation de ces quatre propriétés qui va permettre d'explorer un réseau avec une grande souplesse et une grande modularité des opérations possibles en combinant des changements de paramètres.

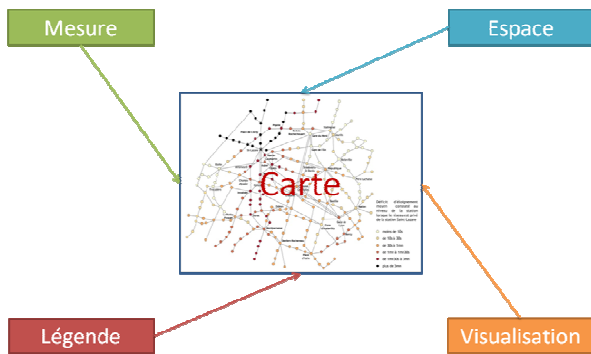


Figure 11. Le concept de carte d'exploration

Tout d'abord, il est nécessaire de pouvoir construire un réseau sur la base d'un graphe. Dans notre travail, nous avons considéré qu'un réseau est un multigraphe orienté dont les nœuds sont géoréférencés. À la spatialisation s'ajoute la métrique de valuation des composantes nœuds et arcs.

En termes d'objet, nous retrouverons dans le modèle global les classes qui siéent classiquement à la modélisation de graphes: un graphe G est composé d'un ensemble de nœuds et d'arêtes.

Nous modélisons également le fait qu'il existe sur le graphe des lieux à mettre en relation (couple Origine-Destination). Ces relations Origines-Destinations sont réalisées par des chemins. Nous avons vu dans la partie 0 qu'il existait différents modes de cheminements.

Ces derniers sont également présents dans le modèle. En effet, nous avons déjà établi qu'une relation OD est composée d'un nœud O et d'un nœud D . Se greffent sur ces relations différents algorithmes de calcul de chemins (plus court chemin, contournement, aléatoire) qui fournissent par la suite des données de type chemins (simples listes descriptives du chemin en termes d'arcs et de nœuds) ou de type flux (matrice de flux OD). Ce sont ces données de cheminements qui vont être utilisées au besoin lors d'un calcul d'indicateur. Les indicateurs relationnels sont généralement basés sur les relations de plus courts chemins (PCC). Les indicateurs présentés plus haut demandent de connaître tous les PCC entre paires de nœuds. Ce problème est connu sous le nom de « All Pairs Shortest Path » (APSP) (Takaoka, 1997 ; Baswana et Kavitha, 2006) et est assez lourd en terme de complexité, souvent en $O(n^3)$. Ces calculs étant assez longs, il est donc intéressant d'avoir calculé et stocké au préalable ces informations afin de ne pas surcharger les calculs d'une centralité intermédiaire en $O(n+m)$ et d'un éloignement moyen en $O(n^2)$.

Un espace est défini comme une collection de couples Origine-Destination. Ces couples sont sélectionnés par l'utilisateur comme des relations d'intérêt sur lesquels des mesures vont par la suite pouvoir être appliquées. Nous pourrions préciser à cette étape par quel mode de cheminement ces couples Origine-Destination vont être reliés.

C'est donc l'espace qui nous permet d'élaborer un indicateur par le biais d'un calcul algorithmique. L'espace est donc le domaine de définition attaché aux calculs.

Une fois qu'un espace a été déterminé, l'utilisateur s'attache au choix d'un indicateur. C'est lui qui permet la mesure des propriétés du réseau. L'objet « indicateur » dérive de plusieurs objets sous-jacents reposant sur une typologie et un classement des indicateurs. L'indicateur calculé va attacher ses résultats comme des valeurs numériques sur les différentes composantes du réseau. Ces valeurs vont par la suite être cartographiées sur le réseau.

Afin d'obtenir une cartographie et une visualisation interactives durant la phase exploratoire d'un réseau, nous avons choisi de séparer topologie et visualisation en ce qui concerne le graphe. Cette séparation est opérée pour deux raisons :

- la première est qu'au niveau conceptuel du modèle, il est préférable de scinder l'espace entre la topologie stricte et la visualisation de cette topologie.
- la seconde est à des fins techniques tant pour la programmation que la rapidité d'accès à certaines informations. Or, il est nécessaire de régulièrement synchroniser des informations entre les classes strictement topologiques et les classes graphiques. Cela est réalisé par de la gestion d'évènements entre entités topologiques et graphiques.

Nous trouverons donc dans le modèle en surcouche des classes graphe, nœuds et arcs ainsi que les classes graphiques qui leur seront associées. Ces classes graphiques nous permettent de créer un objet qui n'a pas de sens au sens topologique strict. Cet objet « zone agrégée » nous permettra de réunir à la fois nœuds et arcs dans une agrégation de type méta-nœud à des fins de simplifications visuelles.

Ces objets en forment un plus global de vue du graphe. Une carte permettant de visualiser des valeurs sur le réseau appellent forcément une légende. Cette dernière traduit les valeurs calculées par l'indicateur. Comme nous l'avons défini plus haut dans les besoins, il est possible d'agir sur les propriétés de la légende en paramétrant le nombre de caissons de légende et bien sûr la couleur des différentes classes. Il est également possible de choisir si les classes de valeurs sont obtenues à partir d'intervalles égaux ou d'effectifs égaux. Tous

ces paramètres permettent de mettre en valeur de l'information. L'utilisateur pourra alors utiliser la légende pour sélectionner des composantes soulignées.

Enfin, nous présentons en figure 12 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** le schéma de modélisation simplifié tel que nous l'avons explicité ci-dessus.

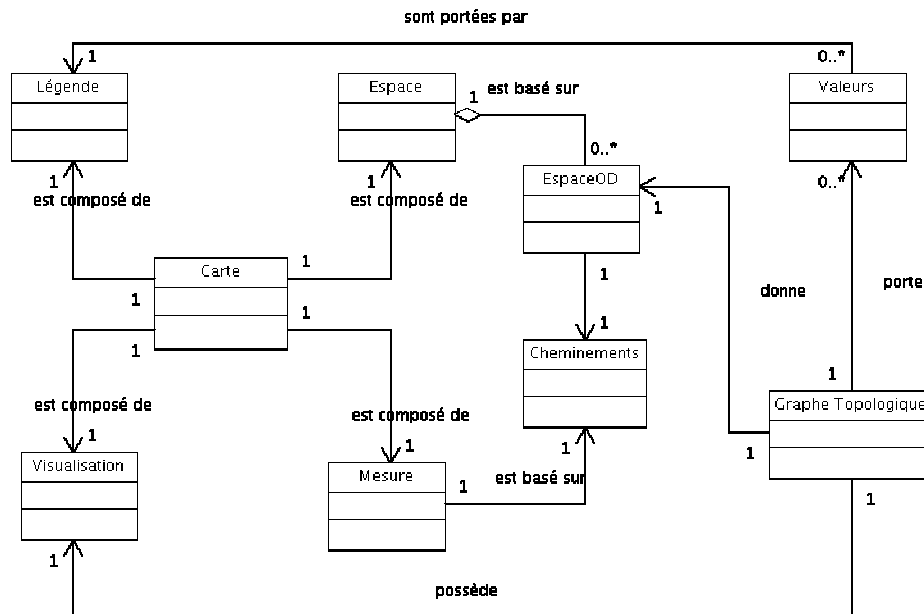


Figure 12. Modèle simplifié de l'exploration

Les propriétés des leviers d'exploration présentés dans le modèle peuvent être variées indépendamment les unes des autres. Chaque variation va créer une nouvelle carte qui est une étape de l'exploration. C'est cette flexibilité conçue autour des changements de caractérisation de la carte qui permet une exploration plus aisée des propriétés d'un réseau.

4. Conclusions et perspectives d'utilisation

Ce travail a pour objectif de proposer un modèle permettant l'exploration des propriétés d'un réseau de transport. Les études géographiques des réseaux combinent un aspect thématique, lié au cadre d'étude du réseau, à l'aspect inhérent à la structure propre du réseau. Pour une meilleure compréhension d'un phénomène, il est utile d'identifier quelle est la part de chacun de ces deux aspects. Dans ce cadre, il est nécessaire d'identifier en quoi les réseaux prédisposent aux phénomènes par une approche dite structurelle. Cette approche consiste à analyser la trame et l'arrangement des composantes au sein du réseau et les potentialités qui en découlent. Ces potentialités intrinsèques sont produites par les chemins que le réseau offre pour mettre en relation des lieux sur le territoire compte

tenu de sa topologie, sa métrique et sa géométrie. Ainsi, en mettant en évidence les facultés décrites, nous pouvons comprendre les parts structurelles et fonctionnelles qui interviennent dans l'explication d'un phénomène intervenant sur un réseau.

L'analyse des réseaux repose sur les possibilités offertes en termes de chemins. Or la première difficulté relative aux chemins est que leur nombre augment de façon quadratique par rapport à la taille du réseau lorsqu'il s'agit de plus courts chemins. La difficulté combinatoire se voit renforcée lorsque l'on veut considérer d'autres types de cheminement sur le réseau (chemins de contournement, marche aléatoire, etc.). La seconde difficulté est d'ordre visuel puisqu'il est difficile pour un œil humain d'appréhender une configuration réticulaire lorsque le réseau se compose de plus de quelques dizaines de nœuds.

Ainsi, nous définissons l'exploration de réseau comme l'ensemble des méthodes permettant d'apprécier l'organisation structurelle d'un réseau dans l'intention de mettre en évidence quelque chose d'inconnu ou qui n'est pas visible à première vue.

Dans cet article nous avons présenté les problèmes rencontrés par un utilisateur voulant explorer un réseau au travers d'une étude de cas. Cette dernière

nous permet d'identifier les besoins relatifs à l'exploration de réseau. Ces quatre leviers permettant l'exploration sont :

- l'espace de définition : une collection de relations Origine-Destination ;

- la mesure : une propriété mathématique synthétisant les informations collectées dans l'espace de définition en termes de relation Origine-Destinations ;

- la vue : la visualisation du réseau permet la simplification visuelle par agrégation de composantes du réseau ;

- la légende : elle explicite les résultats et paramètre une sélection d'informations.

Autour de ces quatre leviers, nous mettons au point un modèle qui permet une exploration de réseau. L'exploration s'effectue par une succession de cartes. Une nouvelle carte est obtenue par la modification des différents leviers. Ainsi, nous obtenons une suite de cartes que l'utilisateur crée en temps réel en fonction de sa réflexion.

La suite de notre travail va consister à améliorer l'ergonomie de la création de cartes. Dans un premier temps, les cartes peuvent être mémorisées

dans un système de couches de cartes. Nous gardons ainsi en mémoire pour chaque carte créée tous les paramètres des quatre leviers. Ces cartes mémorisées et ses paramètres vont par la suite pouvoir être réutilisées pour créer de nouvelles cartes d'exploration. Cette construction par combinaison va s'organiser autour d'un langage graphique. L'exploration de réseaux étant arborescente, ce langage conceptuel va permettre de conserver un historique visuel des différentes étapes de la réflexion de l'utilisateur.

L'approche étant basée sur une analyse de la structure du réseau, le modèle mis en place dans cet article peut tout à fait s'adapter à d'autres types de réseaux pour lesquels la position des nœuds peut ne pas être primordiale (réseaux sociaux ou réseaux d'entreprise). En effet, les études sur ces types de réseau utilisent les mêmes indicateurs que ceux que nous avons décrits (Wasserman et Faust, 1994). Les problématiques d'exploration concernant les grands volumes de données sont identiques, d'où la nécessité de mettre au point des méthodes permettant à l'utilisateur de mieux comprendre l'arrangement des composantes d'un réseau et ses réactions face à différentes sollicitations.

5. Bibliographie

- Arentze T. A., Timmermans H. J. P., 2005, A cognitive agent-based simulation framework for dynamic activity-travel scheduling decision, *Proceedings Knowledge, Planning and Integrated Spatial Analysis*.
- Balmer M., Meister K., Rieser M., Nagel K., Axhausen K. W., 2008, Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MATSim-T, *Conference on innovations in travel Modeling*, Portland, June 2008, <http://matsim.org/uploads/BalmerEtAl2008ITM.pdf>
- Baswana S., Kavitha T., 2010, Faster Algorithms for All-Pairs Approximate Shortest Paths in Undirected Graphs, *SIAM Journal of Computing*, in press.
- Beguïn H., Thomas I., 1997, Morphologie du réseau de communication et localisations optimales d'activités - Quelle mesure pour exprimer la forme d'un réseau ?, *Cybergeo, Revue Européenne de Géographie*, 26 <http://cybergeo.revues.org/index2189.html>
- Berge C., 1973, *Graphes*, Gauthier-Villars, Paris.
- Berger M., Quesseveur E., 2008, Méthode pour une évaluation multiscalaire de l'accessibilité aux soins : le cas de l'hémophilie, SAGEO'2008, Montpellier, 25-26 juin 2008.
- Blondel V., Sennelart P., 2002, Automatic extraction of synonyms in a dictionary, SIAM Workshop on Text Mining, Arlington (USA), 11-13 April 2002.
- Bollobas B., 1998, *Modern graph Theory*, Springer Verlag, New York.
- Bretagnolle A., Pumain D., 2005, Artificial Intelligence and collective agents: a generic multi-agent model for simulating evolution of urban systems, European Conference in Complex System (ECCS'05), Paris, November 2005.
- Chapelon L., 1997, Offre de transport et aménagement du territoire: évaluation spatio-temporelle des projets de modification de l'offre par modélisation multi-échelles des systèmes de transport, Thèse de doctorat, Université de Tours.
- Chapelon L., Jouveaud B., Ramora S., 2003, Localisation de la gare TGV de Nîmes : évaluation spatiale et temporelle des scénarios d'aménagement, Rapport de recherche, UMR ESPACE, Université de Montpellier.
- Dupuy G. (ed.), 1991, *L'urbanisme des réseaux: théories et méthodes*, Colin, Paris.
- Dykes J., MacEachren A., Kraak M. (eds.), 2005, *Exploring Geovisualization*, Elsevier, London.
- Ferrer-i-Cando R., Sole R. V., 2001, The small world of human language, *Proceedings of The Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 2261-2265.
- Gleyze J., 2005, La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques, Thèse de doctorat, Université de Paris VII.

- Gleyze J., 2003, Fonctionnalité et vulnérabilité des réseaux de transport – Le cas du métro parisien, *Actes des 6^{èmes} rencontres Théo Quant*, Besançon, 20-21 février 2003,
<http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2003/TQ2003%20ARTICLE%2040.pdf>
- Grasland C., Martin H., Vincent J., Gensel J., Mathian H., Cuenot O., Euloge E., Lizzi L., 2005, Le projet Hypercarte : analyse spatiale et cartographie interactive, *Actes de SAGEO'2005*, Avignon, 20-23 juin 2005.
- Gutiérrez, J., Monzón, A., Piñero, J. M., 1998, Accessibility, network efficiency, and transport infrastructure planning, *Environment and Planning A*, 30, 1337-1350.
- Hillier B., Leaman A., Stansall P., Bedford M., 1976, Space Syntax, *Environment and Planning B*, 3(2) 147-185.
- Jeong H., Tombor B., Albert R., Oltvai Z., Barabasi A., 2000, The large-scale organization of metabolic networks, *Nature*, 407, 651-654.
- Joliveau T., 2006, Concepts, méthodes et usages des SIG, UJM 2006, Université Saint-Etienne.
- Karlström A., Mattson L., 2009, Place, space syntax and attraction-accessibility, *Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium*, Stockholm.
- Mathis P., Bailleul H., Feildel B., Buguellou J., Moquillon C., 2008, Le modèle SIMULH, UMR CITERES, Université de Tours.
- Parlebas P., 1972, Centralité et compacité d'un graphe, *Mathématiques et Sciences Humaines*, 39, 5-26.
- Read S., 1998, Space Syntax and the Dutch City, *In: Proceedings of the 1st International Space Syntax Symposium*, London, 3, 251-264.
- Rozenblat C., Bohan C., Benet G., 2007, Les réseaux d'entreprises multinationales et l'attractivité des villes d'Europe centrale, *Colloque sur Les disparités régionales en Europe centrale, Bratislava*, le Centre français de recherche en sciences sociales (CEFRES).
- Schettini F., Duquesne C., Gendre P., Romain H., Jonglez D., Ribot N., 2007, Le projet POTIMART : Programmes Open source pour le Traitement de l'Information Multimodale et l'Analyse des Réseaux de Transport, *Actes de SAGEO'2007*, Clermont-Ferrand, 18-20 juin 2007.
- Takaoka T., 1997, Sub-cubic Cost Algorithms for the All Pairs Shortest Path Problem, Department of Computer Science, University of Canterbury, Christchurch (New Zealand).
- Wasserman S., Faust K., 1994, *Social Network Analysis – Methods and applications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Williams R. J., Martinez N. D., 2000, Simple rules yield complex food webs, *Nature*, 404, 180-183.